

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Escuela Universitaria de Ingeniería
Técnica de Telecomunicación**



**ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ACTUALES
TÉCNICAS BIOMÉTRICAS**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y SERVICIOS
ACCESIBLES PARA LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN**

Mario Navalpotro Molina

Julio de 2014



A mis padres y hermana por sostenerme, apoyarme,
ilusionarme, hacerme sentir querido y privilegiado,
y sobre todo por ayudarme a ser mejor persona.

A mi familia y amigos por ayudarme siempre,
por su apoyo incondicional,
por llenar mi vida de buenos momentos y recuerdos

A Laura porque sin ella ni este trabajo, ni mi vida sería igual,
gracias porque a tu lado ser mejor persona es algo sencillo,
gracias por hacer del día a día una sonrisa permanente.

A mi tutor, D. Pedro Costa, por su paciencia,
cercanía, complicidad y optimismo.

Un ejemplo de tutor y profesor.



ÍNDICE

ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	15
RESUMEN	16
SUMMARY	17
1 INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. Objetivos	21
1.2. ¿Qué es la biometría?	22
1.3. Ventajas de la biometría	24
1.4. Breve historia de la biometría	27
1.5. Partes de un sistema biométrico.....	31
1.6. Tipos de sistemas de identificación biométrica	35
2 ADN	39
2.1. Introducción	41
2.2. Historia	41
2.3. Uso del ADN como identificador biométrico	50
2.3.1. Marcadores genéticos que se usan en la identificación biométrica	50
2.3.2. Tipos de ADN sometidos a estudio de marcadores genéticos.....	52
2.3.2.1 ADN nuclear.....	52

2.3.2.2	ADN mitocondrial	54
2.3.2.3	Polimorfismos del cromosoma Y	55
2.3.3.	Análisis de las muestras de ADN	57
2.3.3.1	Extracción o individualización de las muestras biológicas	59
2.3.3.2	Análisis y tipos de muestras biológicas	60
2.3.3.3	Tipos de muestras dubitadas e indubitadas	61
2.3.3.4	Exclusión e inclusión de resultados	62
2.3.4.	Investigación de la paternidad	63
2.3.4.1	La probabilidad de paternidad	64
2.3.5.	Identificación de restos cadavéricos	65
2.3.6.	Bases de datos	67
3	FIRMA ESCRITA	71
3.1.	Introducción	73
3.2.	Historia de la Caligrafía	74
3.3.	Técnicas analógicas de procesado de la firma.	81
3.3.1.	Método de estudio analógico	82
3.3.2.	Patrón gráfico de confrontación	85
3.3.3.	Documentos firmados en blanco	86
3.3.4.	Principios básicos de la pericia caligráfica	87
3.4.	Técnicas digitales de procesado de la firma	88
3.4.1.	Acondicionamiento de la señal de la firma	89

3.4.2. Extracción de características y representación de la firma	91
4 IRIS.....	93
4.1. Introducción.....	95
4.2. Historia	96
4.3. Anatomía del ojo.....	98
4.3.1. El globo ocular.	98
4.3.2. La capa externa.	99
4.3.3. Las capa media e interna.	99
4.3.4. Iris.....	101
4.3.4.1 Aspectos diferenciadores del iris.....	101
4.4. Fundamentos del reconocimiento del iris.....	103
4.4.1. Partes de un sistema de reconocimiento.....	106
4.4.1.1 Proceso de adquisición de la muestra.....	107
4.4.1.2 Extracción de características	108
4.4.1.3 Comparación de plantillas	108
4.4.1.4 Proceso de decisión.....	109
4.5. Aplicaciones	109
5 HUELLA DACTILAR.....	111
5.1. Introducción.....	113
5.2. Historia	113
5.3. Formación de las huellas dactilares.....	116

5.4. Adquisición de huellas dactilares	118
5.4.1. Sensores estáticos	119
5.4.2. Sensores de desplazamiento	119
5.4.3. Tecnologías de sensores de huella dactilar.....	120
5.4.3.1 Ópticos.....	120
5.4.3.2 Estado Sólido.....	123
5.4.3.3 Sin Contactos.....	127
5.5. Clasificación de las huellas dactilares.....	129
5.6. Extracción de características	131
5.6.1. Obtención de la orientación local y frecuencia de las crestas.....	131
5.6.2. Segmentación	132
5.6.3. Detección de singularidades	132
5.6.4. Mejora y binarización	133
5.6.5. Extracción de minucias	134
5.7. Comparación de huellas	135
5.7.1. Técnicas basadas en correlación	137
5.7.2. Técnicas basadas en minucias	138
5.7.3. Técnicas basadas en patrones de crestas o texturas.....	141
5.7.4. Influencia de la calidad en el rendimiento de las técnicas de matching	142
6 RECONOCIMIENTO FACIAL.....	145
6.1. Introducción.....	147

6.2. Historia	147
6.3. Problemática del reconocimiento facial automático	150
6.4. Los sistemas de reconocimiento facial automático: conceptos relacionados	152
6.5. Reconocimiento facial a partir imágenes de intensidad 2D	154
6.5.1. Técnicas basadas en rasgos locales.....	155
6.5.1.1 Extracción de rasgos locales.....	156
6.5.1.2 Técnicas de procesamiento de imágenes.	157
6.5.1.3 Sistemas de reconocimiento facial basados en rasgos locales	158
6.5.2. Técnicas holísticas.....	161
6.5.2.1 Técnicas basadas en el análisis de componentes principales..	162
6.5.2.2 Técnicas conexionistas	167
6.5.3. Detección de caras en la imagen 2D.....	168
6.5.3.1 Métodos basados en redes neuronales.....	168
6.5.3.2 Métodos basados en el Análisis de Componentes Principales.	169
6.5.3.3 Métodos que emplean Support Vector Machines.	169
6.6. Reconocimiento facial a partir de imágenes 3D	169
6.6.1. Técnicas de adquisición de imágenes 3D	170
6.6.1.1 Técnicas pasivas.	170
6.6.1.2 Técnicas activas.	171
6.6.2. Técnicas de reconocimiento 3D basadas en rasgos locales	173
6.6.2.1 Métodos basados en la curvatura local de la superficie.	174

6.6.2.2	Métodos basados en plantillas.	174
6.6.2.3	Métodos basados en el cálculo de la firma.....	174
6.6.2.4	Métodos que utilizan datos 3D e información de color.	175
6.6.3.	Técnicas de reconocimiento 3D holísticas	175
6.6.3.1	Técnicas basadas en modelado 3D.....	175
6.6.3.2	Técnicas 3D basadas en el análisis de componentes principales 176	
6.7.	Reconocimiento Facial 3D en Medicina Forense	178
6.8.	Reconocimiento facial a partir del movimiento	179
7	VOZ	181
7.1.	Introducción.....	183
7.2.	Historia y evolución del habla y del lenguaje	186
7.2.1.	Teorías sobre el origen del lenguaje	192
7.3.	Historia del reconocimiento de voz	194
7.4.	Actores en el reconocimiento de voz	196
7.5.	Sistemas de reconocimiento de voz	198
7.5.1.	Procesado de la señal de voz	200
7.5.2.	Técnicas de reconocimiento de patrones	201
7.5.3.	Modelado dependiente del estilo de habla	202
7.5.4.	Dependencia del locutor.....	203
7.5.5.	Dependencia del vocabulario	204
7.5.6.	Gramáticas de reconocimiento.....	204

7.6. Técnicas de diseño para un sistema de reconocimiento de voz	205
7.6.1. Dynamic Time Warping	205
7.6.2. Modelos ocultos de Markov	206
7.6.3. Redes neuronales	209
7.6.4. Reconocimiento basado en el conocimiento	211
7.7. Módulos de un sistema de reconocimiento	211
7.7.1. Módulo de procesado acústico	211
7.7.2. Módulo de análisis fonético	212
7.7.3. Módulo de análisis fonológico	212
7.7.4. Módulo de análisis morfológico	212
7.7.5. Módulo de análisis sintáctico	213
7.7.6. Módulo de análisis semántico	213
7.7.7. Módulo de análisis pragmático	214
7.7.8. Módulo de análisis del conocimiento del mundo	214
7.7.9. Estructura del sistema de reconocimiento	215
8 ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS ESTUDIADAS	219
8.1. Universalidad	222
8.2. Unicidad	223
8.3. Permanencia	225
8.4. Mensurabilidad	226
8.5. Rendimiento	227

8.6. Aceptabilidad	229
8.7. Invulnerabilidad	231
8.8. Ponderación	233
9 CONCLUSIONES	237
10 BIBLIOGRAFIA.....	243

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	NIVEL DE SEGURIDAD SEGÚN LOS MÉTODOS CONCEPTUALES.....	27
FIGURA 2.	AUTORRETRATO DE ALPHONSE BERTILLON.....	28
FIGURA 3.	FICHA BIOMÉTRICA DE FRANCIS GALTON	29
FIGURA 4.	DIFERENTES TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN	36
FIGURA 5.	ANATOMÍA DE UN OJO HUMANO	99
FIGURA 6.	FOTORECEPTORES: BASTONES Y CONOS	100
FIGURA 7.	IMÁGENES AMPLIADAS QUE MUESTRAN LOS FOTORRECEPTORES DE LA RETINA: CONOS Y BASTONES (IZQUIERDA) Y UNA SECCIÓN DE UN IRIS (DERECHA).	101
FIGURA 8.	VISTA FRONTAL DE OJO HUMANO (IZQUIERDA Y CENTRO) Y EJEMPLO DE DESPIGMENTACIÓN (DERECHA)....	102
FIGURA 9.	CINCO IRIS DISTINTOS	103
FIGURA 10.	PARTES DE UN SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE IRIS.....	106
FIGURA 11.	FICHA DACTILOSCÓPICA DE FRANCISCA ROJAS	116
FIGURA 12.	PIEL HUMANA, CORTE TRANSVERSAL.....	117
FIGURA 13.	SENSOR FTIR.....	121
FIGURA 14.	SENSOR FTIR CON CONJUNTO DE PRISMAS	121
FIGURA 15.	SENSOR DE FIBRA ÓPTICA.....	122
FIGURA 16.	SENSOR ELECTRO-ÓPTICO	122
FIGURA 17.	SENSOR ULTRASÓNICO	123
FIGURA 18.	SENSOR DE CAMPO ELÉCTRICO.....	124
FIGURA 19.	SENSOR DE PRESIÓN.....	125
FIGURA 20.	SENSOR CAPACITIVO	126
FIGURA 21.	SENSOR TÉRMICO	127
FIGURA 22.	SENSOR RTFI.....	127
FIGURA 23.	SENSOR TTFI	128
FIGURA 24.	SENSOR TOUCHLESS	129
FIGURA 25.	TIPOS DE HUELLAS EN FUNCIÓN DE SU PATRÓN DE CRESTAS Y VALLES.....	129
FIGURA 26.	LOS SISTEMAS PAPILARES.....	130
FIGURA 27.	MINUCIAS PROPIAS DE UNA HUELLA DACTILAR.....	131
FIGURA 28.	SEGMENTACIÓN DE LA ZONA DE INTERÉS DE UNA HUELLA DACTILAR.	132
FIGURA 29.	EJEMPLOS DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE POINCARÉ.	133
FIGURA 30.	BINARIZACIÓN DE UNA HUELLA.	133
FIGURA 31.	EXTRACCIÓN DE MINUCIAS; BIFURCACIONES (CUADRADOS) Y FIN DE CRESTAS (CÍRCULOS).....	134
FIGURA 32.	SECUENCIA DE EXTRACCIÓN DE MINUCIAS.	135
FIGURA 33.	DOS REALIZACIONES DE LA MISMA HUELLA EN INSTANTES DIFERENTES.	136

FIGURA 34.	CORRELACIÓN LOCAL ENTRE HUELLAS.	138
FIGURA 35.	COMPARACIÓN DE HUELLAS BASADA EN MINUCIAS. (A) Y (B) HUELLAS A COMPARAR, (C) ALINEACIÓN ENTRE HUELLAS Y (D) DETECCIÓN DE MINUCIAS COINCIDENTES.	140
FIGURA 36.	ALPHONSE BERTILLON REALIZANDO MEDIDAS.....	148
FIGURA 37.	CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA DE RECONOCIMIENTO FACIAL GENÉRICO.....	153
FIGURA 38.	(A) VECTOR DE N CARACTERÍSTICAS QUE REPRESENTA A UNA CARA O PATRÓN, Y (B) CLASES DE PATRONES CORRESPONDIENTES A DOS INDIVIDUOS DISTINTOS, PARA UNA REPRESENTACIÓN QUE UTILIZA DOS CARACTERÍSTICAS.	159
FIGURA 39.	CORTE ESQUEMÁTICO DEL APARATO FONATORIO.....	184
FIGURA 40.	CORTE ESQUEMÁTICO DE LA LARINGE SEGÚN UN PLANO HORIZONTAL.....	185
FIGURA 41.	MODELO GENÉRICO DE COMUNICACIÓN PARA RECONOCIMIENTO DEL HABLA.	199
FIGURA 42.	REPRESENTACIÓN DE MODELO DE MARKOV	208
FIGURA 43.	REDES NEURONALES	210
FIGURA 44.	MODELO CIRCULAR.....	216
FIGURA 45.	MODELO DE MEMORIA COMPARTIDA.....	217

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA. I.	VALORACIÓN BASADA EN LAS CARACTERÍSTICAS DE MALTONI	233
TABLA. II.	RANKING DE TÉCNICAS	234

RESUMEN

El siguiente Trabajo Fin de Master se divide en tres partes, siempre, alrededor de la identificación biométrica. Esta ciencia aprovecha que existen ciertas características biológicas o conductuales singulares e inalterables, por lo que pueden ser analizados y medidos para crear una huella biométrica. Estas características son difíciles de perder, transferir u olvidar y son perdurables en el tiempo.

En la primera de las partes se ofrecerá una visión sobre la importancia histórica de esta ciencia, desde los primeros vestigios humanos, en la zona de Mesopotamia, pasando por los grandes innovadores y precursores de la identificación biométrica, como Bertillon, Galton, Vucetich, etc. auspiciados por una finalidad mayoritariamente criminalística o policiaca, hasta la gran revolución a finales del siglo pasado, en las que técnicas que parecían ciencia ficción se hicieron realidad.

En el siguiente apartado se analizarán las 6 principales técnicas que se usan actualmente, realizando una mirada más profunda en los principios naturales, fisiológicos y físicos sobre los que se basan se expondrán las tendencias futuras sobre las que trabajara la industria para el desarrollo de técnicas más seguras, menos invasivas y más transparentes para los usuarios finales. Estas como ha pasado a lo largo de la historia sonaran increíbles, pero una vez más la raza humana conseguirá materializarlas e introducirlas en su día a día

Para finalizar y después de este estudio en detalle, se intentará realizar una comparación y análisis basados en las más importantes características para las técnicas biométricas, fiabilidad, facilidad, usurpación, aceptación y estabilidad, etc.

SUMMARY

The following Master's Thesis is divided into three parts, always, about biometric identification. This science fails that certain biological or behavioural characteristics are unique and unchangeable, so it can be analysed and measured to create a biometric fingerprint. These features are hard to miss, or forget to transfer and are enduring in time.

In the first part a vision of the historical importance of this science is offered, from the earliest human remains in the area of Mesopotamia, to the great innovators and pioneers of biometric identification, such as Bertillon, Galton, Vucetich, etc. . sponsored a largely forensic or detective purpose, until the great revolution in the late nineteenth century, in which techniques that seemed science fiction became reality.

The following section will analyse the 6 main techniques currently in use, making a deeper look at the natural, physiological and physical principles on which future trends are based on the industry to work for the development of techniques will be discussed more safely, less invasive and more transparent to end users. Such as has happened throughout history sounded amazing, but once again the human race gets materialized and introduces them in their day to day

Finally and after the study in detail, and try to make a comparison based on the most important features for biometric technologies, reliability, ease, alienation, acceptance and stability analysis etc..



1

INTRODUCCIÓN.



1.1. Objetivos

Vivimos en una sociedad obsesionada con la seguridad, con el celo de nuestro dinero, nuestros datos, nuestras propiedades. En ella los sistemas de seguridad cada vez son más complejos y más completos, pero una siguiente vuelta de tuerca, una manera de robustecerlos es mejorar e incrementar la interacción de los usuarios con el sistema, evitando de esta manera, falsificaciones, imposturas, etc.

En esta línea se encuadra el desarrollo de los sistemas de identificación biométrica, inicialmente los sistemas de seguridad dependían de algo que se tenía, una llave, una tarjeta. Posteriormente de algo que se sabía, algo que se memorizaba, que se conocía, una clave, una frase secreta, un número pin, etc. Más tarde se mezclaron estos dos conceptos anteriores, creando tarjetas físicas o llaves que se apoyaban en una clave o un número pin para reforzar la seguridad del acceso o transacción. Pero la globalización, el desarrollo de las tecnologías y el más fácil acceso a ellas ha demostrado que esto es insuficiente, que estos sistemas son vulnerables, y que los ladrones siempre están solo un paso por detrás, por lo que se está recurriendo, a algo que no es nuevo, algunas técnicas tienen un origen milenario y un pasado moderno de más de siglo y medio, pero que sí que incrementa la seguridad, lo que somos y cómo somos. Esas características únicas, inherentes a cada ser humano, universales, que están en nuestro cuerpo o en nuestros hábitos, es decir características biométricas, son las que dificultan la falsificación y multiplican la seguridad de los sistemas.

Como todos los avances no todo iban a ser ventajas. Estas técnicas biométricas necesitan de un desarrollo mayor del sistema, de unas tecnologías más maduras, para que no sea el propio proceso, la tecnología o los algoritmos los que provoquen un falso positivo. Todo esto abre un excepcional abanico a todo tipo de investigaciones, desarrollos y trabajos en búsqueda del desarrollo de cada una de ellas, para hacerlas fiables, seguras y accesibles.

Por todo esto los objetivos de este TFM serán los siguientes:

1. Conocer la historia y fundamentos de una ciencia en constante crecimiento y en actual auge. Historia extensa para alguna de las técnicas y menos larga

pero más intensa para otras ya que debido al desarrollo tecnológico creciente de las últimas décadas han sufrido notables avances y mejoras.

2. Profundizar en cada una de las técnicas, estudiando en ellas:
 - Su historia y evolución. Cada una de las técnicas tiene una historia, en algunos casos milenarias, en todas ellas se adapta a la característica fisiológica que explora, y en todos los casos son historias de investigación y grandes hallazgos.
 - Las bases físicas y fisiológicas. Cada técnica está basada en una característica fisiológica propia de los seres humanos.
 - Procesos en los que se basa cada una de las identificaciones. Todas las técnicas utilizan más de un proceso de análisis y de implementación para conseguir el máximo desarrollo de las características propias de la técnica biométrica. Estos procesos se engloban dentro del muestreo, análisis, comparación, verificación, etc.
 - Aplicaciones actuales. Al igual que hay más de un proceso y desarrollo para cada técnica, existe más de un producto o aplicación comercializable o no, para cada una de ellas. Ampliando el alcance de una técnica para más de un sector civil, bancario, militar, aeroportuario, etc.
3. Comparación de todas ellas, evaluándolas en siete apartados y obteniendo un ranking para determinar las cualidades de cada una de ellas. Centrados en las siete características definidas por el investigador italiano Davide Maltoni. Universalidad, unicidad, permanencia, mensurabilidad, rendimiento, aceptabilidad e invulnerabilidad todas ellas igual de importantes y que ponderándolas pueden ofrecer una foto de las técnicas más completas. Con estas siete características se puede ver cuáles de las técnicas son potentes por la característica fisiológica en la que se basan y cuales por el desarrollo y evolución que han sufrido por parte de los investigadores y la industria.

1.2. ¿Qué es la biometría?

Según el Diccionario de la Real Academia Española, se define biometría como "Estudio mensurativo o estadístico de los fenómenos o procesos biológicos". Esta

definición se hace más específica cuando se utiliza el término de Biometría dentro del campo de la Identificación de Personas.

Según el Biometric Consortium, la Biometría son “métodos automáticos de reconocimiento de una persona basados en características fisiológicas o de comportamiento. Expuesto de una forma más simple, la Biometría consigue reconocer a una persona mediante una imagen de su rostro o mediante la impresión de su huella dactilar”.

Otra definición que corre entre las principales enciclopedias en castellano es “Ciencia que se sirve de métodos estadísticos para analizar problemas biológicos que se pueden expresar cuantitativamente, es decir, mediante mediciones.

Podríamos seguir dando definiciones sobre esta ciencia pero todas nos llevarían sobre los mismos pasos, y no son otros que el de aspectos físicos, biológicos y fisiológicos de la raza humana que son diferenciales, medibles y por lo tanto definitorios para nuestra identificación respecto a otro sujeto de nuestra misma especie.

O también como la ciencia por la que se puede identificar a una persona basándose en sus características biofísicas o de comportamiento, es decir algo que el ser humano posee de manera intrínseca. El término biometría comprende un amplio espectro de tecnologías mediante el uso de las cuales se permite verificar la identidad de una persona a partir del análisis de la medida de estas características, confiando en atributos propios de cada individuo en lugar de en cosas que conocen o poseen.

La capacidad para la identificación biométrica llevada a cabo por cualquier persona es algo innato, ya que siempre se ha utilizado esta técnica de manera inconsciente para reconocer a una persona por la calles o en una fotografía por ejemplo. Los distintos tipos de tecnología biométrica varían en complejidad, capacidades y modo de funcionamiento y pueden ser usadas para verificar o establecer la identidad de una persona. Sin embargo comparten igualmente elementos comunes. Todos hacen uso de dispositivos de adquisición de información adaptados a cada caso en particular, tales como cámaras o escáneres para obtener imágenes, registros o medidores, al igual que de software y hardware adaptado para extraer, codificar, almacenar y comparar las características medidas. Este carácter automático

de los sistemas biométricos permite que el proceso de toma de datos y decisión sea muy rápido en algunos casos de tan solo de unos segundos de tiempo real.

Este grupo de diversas tecnologías puede ser usado por si solo o en combinación con algunos de los otros factores con el fin de reforzar la seguridad. La biometría presenta diversas ventajas respecto a las tecnologías desarrolladas en base a los otros dos factores, sobre todo en el hecho de que en ningún momento se le puede perder u olvidar a una persona su característica biométrica, siendo solo susceptible de falsificación, y en muchos casos como se verá en la descripción de cada uno de los diferentes tipos de tecnologías biométricas, esta posibilidad de fraude al sistema ha sido estudiada y eliminada.

La tecnología es por tanto capaz de aprovechar rasgos característicos de las personas, ya sean de carácter físico o de comportamiento, para llevar a cabo el reconocimiento de una persona de manera automática

Durante este capítulo se tocarán todas las características de los sistemas biométricos necesarios para ofrecer una foto completa antes del estudio de las seis técnicas objetivo. Para ello se estudiará las ventajas, una breve historia, las partes genéricas que casi todos los sistemas biométricos comparten, y por último los posibles sistemas de identificación dividiéndolos entre características físicas y del comportamiento.

1.3. Ventajas de la biometría

Sin duda, la principal ventaja de la biometría es que es más cómoda y segura que los sistemas tradicionales como las contraseñas, llaves, o tarjetas. Es más cómoda porque no se puede perder ya que el elemento de identificación es una parte de nosotros mismos y no un elemento externo (como por ejemplo las tarjetas o llaves). La biometría es más segura: al no haber contraseña, no puede ser olvidada y resulta compleja de falsificar. Y, además, se puede combinar con otros sistemas de seguridad. Económicamente también presenta ventajas ya que no supone coste de mantenimiento. Al no haber ningún dispositivo externo de identificación, no hay que renovarlo cada cierto tiempo por caducidad, desperfecto, robo o pérdida.

Sin dudas, las tecnologías biométricas pueden ser una alternativa o un complemento de las técnicas de identificación y autenticación ya existentes. A continuación hacemos una comparación directa entre estas, destacando los beneficios que resultan del uso de biometría junto con aspectos en los que las técnicas tradicionales siguen siendo superiores. [1]

- Necesidad de secreto: Las contraseñas han de ocultarse y las tarjetas no deben estar al alcance de terceros, mientras que la biometría no requiere de estas medidas de protección que son exclusivamente dependientes del usuario.
- Posibilidad de robo: Las tarjetas y contraseñas pueden ser robadas. Sin embargo, robar un rasgo biométrico es extremadamente complejo.
- Posibilidad de pérdida: Las contraseñas son fácilmente olvidables y las tarjetas se pueden perder. Los rasgos biométricos permanecen invariables salvo en contadas excepciones y siempre están con el sujeto a quien identifican.
- Registro inicial y posibilidad de regeneración: La facilidad con la que se puede enviar una contraseña o tarjeta nueva contrasta con la complejidad que supone el registro en un sistema biométrico, ya que requiere de la presencia física del individuo en esta fase. Hay que añadir que los rasgos biométricos son por definición limitados, mientras que la generación de contraseñas tiene la ventaja de ser ilimitada.
- Proceso de comparación: La comparación de dos contraseñas es un proceso sencillo. Sin embargo, comparar dos rasgos biométricos requiere de mayor capacidad computacional.
- Comodidad del usuario: El usuario ha de memorizar una o múltiples contraseñas y, en el caso de que use una tarjeta, ha de llevarse siempre consigo. Utilizando tecnología biométrica no se necesita realizar estos esfuerzos.
- Vulnerabilidad ante el espionaje: Una discreta vigilancia de nuestra actividad podría servir para obtener nuestra contraseña o robar nuestra tarjeta. Ese método no es válido ante los sistemas biométricos.
- Vulnerabilidad a un ataque por fuerza bruta: Las contraseñas tienen una longitud de varios caracteres. Por su parte, una muestra biométrica

digitalizada emplea cientos de bytes, lo que complica mucho los ataques por fuerza bruta.

- Medidas de prevención: Los ataques contra sistemas protegidos por contraseña o tarjeta se producen desde hace años, y las medidas de prevención contra ellos ya se encuentran maduras. Por el contrario, los ataques a los sistemas biométricos son un área en la que estas medidas de prevención se están generando en estos momentos.
- Autenticación de usuarios 'reales': La autenticación de usuarios mediante contraseña o tarjeta y su efectividad, dependen absolutamente de la voluntad del usuario a la hora de hacerlas personales e intransferibles. La biometría está altamente relacionada con el propio usuario pues no puede ser prestada ni compartida.
- Coste de implantación: En el momento de la implantación, el hecho de instaurar un sistema de contraseñas tiene un coste bajo, mientras que en el caso de un sistema basado en muestras biométricas es más costoso.
- Coste de mantenimiento: El coste de mantenimiento de un sistema biométrico, una vez está implantado con éxito, es menor al de un sistema de contraseña o tarjeta ya que no conlleva gastos de gestión asociados a la pérdida u olvido de credenciales.

La combinación de las tecnologías biométricas en conjunto con otras tecnologías como las tarjetas de proximidad o la tecnología NFC (Near Field Communication) es óptima, especialmente en entornos de máxima seguridad donde la autenticación es un proceso crítico. Su uso combinado mejora notablemente la seguridad.

Estas ventajas de las técnicas biométricas, aparecerán en menor o mayor medida según la técnica utilizada. Teniendo en cuenta estos factores, podemos decir, que

la biometría es una técnica muy recomendable para la identificación de personas

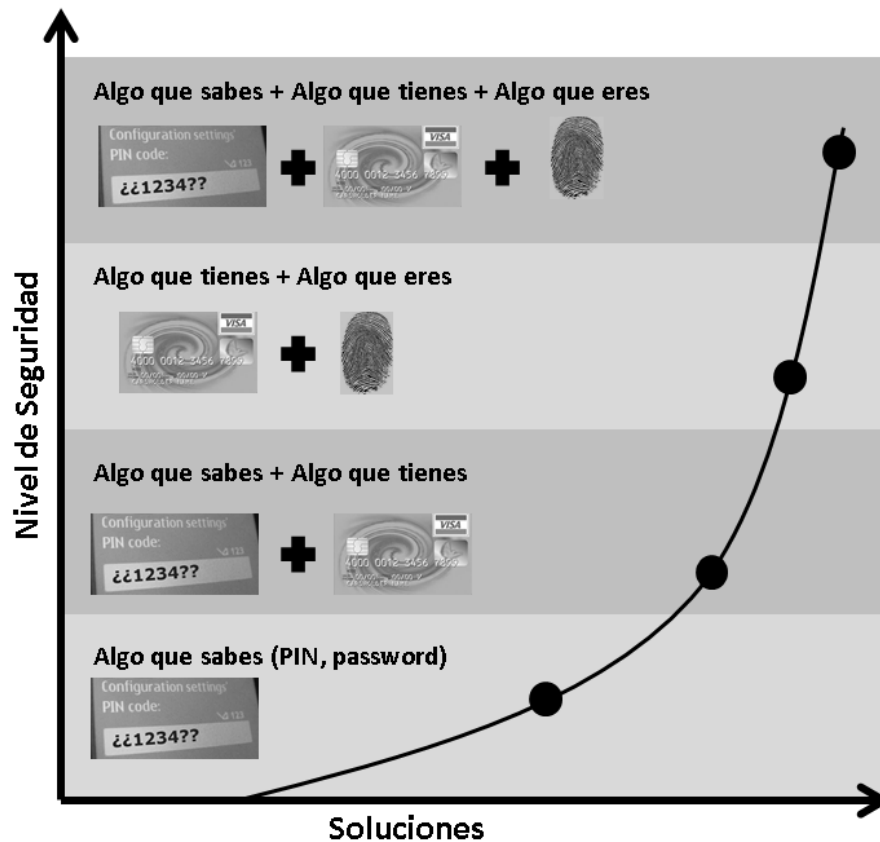


Figura 1. Nivel de seguridad según los métodos conceptuales

1.4. Breve historia de la biometría

Hallazgos arqueológicos han descubierto que en la época de los faraones, en el Valle del Nilo ya se utilizaban los principios básicos de la identificación biométrica para verificar a las personas que participaban en diferentes actividades comerciales y judiciales del antiguo Egipto. Desde entonces la historia continua [2]:

2600 A.C. En el antiguo Egipto, los trabajadores que construían las pirámides se identificaban por la longitud de sus brazos.

500 A.C. En Babilonia, se usaba la huella dactilar impresa en arcilla como firma de transacciones comerciales.

1686. Marcelo Malpighi, en la Universidad de Bolonia, observa y clasifica las crestas, espirales y bucles de una huella dactilar.

1823. John Evangelist Purkinje, profesor de anatomía de la Universidad de Brealau, publica su tesis detallando nueve patrones de la huella dactilar.

1870. El francés Alphonse Bertillon propone un método de identificación de personas basado en el registro de las medidas de diversas partes del cuerpo: el Bertillonage

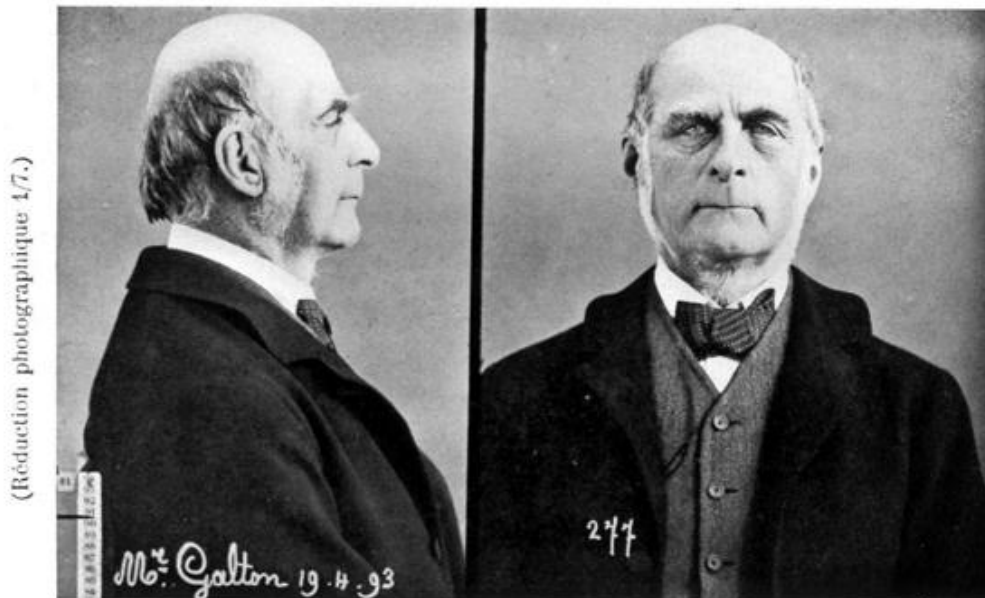


Figura 2. Autorretrato de Alphonse Bertillon

1880. El Dr. Faulds publica un artículo en el diario científico, “Nature” en el que explica que las huellas dactilares se podrían utilizar como “los medios de identificación personal”, y el uso de la tinta de las imprentas como método para obtener tales huellas.

1888. El antropólogo inglés Francis Galton, publica los resultados de su estudio científico del uso de los relieves dactilares en el libro “Huellas dactilares”. Los estudios de Galton verificaron tanto la invariabilidad de las huellas digitales a lo largo de toda la vida de un individuo, como su carácter distintivo, aun para gemelos idénticos.

Taille 1 ^m _____	Long ^r _____	Pied g. _____	N ^o de cl. _____	Agé de _____
Voute _____	Larg ^r _____	Médus g. _____	Aur ^{te} _____	né le _____
Enverg 1 ^m _____	Long ^r _____	Auric ^{te} g. _____	Pér ^{te} _____	a _____
Buste 0, _____	Larg ^r _____	Coudée g. _____	Part ^{te} _____	dep ^r _____
				âge app ^r _____



Front.	Inclin ^r _____	Racine (cavité) _____	Bord o. s. p. f. _____	Barbe _____	Col ^r (pig ^{te}) _____
	Haut ^r _____	Dos _____ Base _____	Lob. c. a. m. d. _____	Cheveux _____	Col ^r sang ^r _____
	Larg ^r _____	Haut ^r Saillie. Larg ^r _____	A. trg. i. p. r. d. _____	Car _____	Coint. _____
	Part ^{te} _____	l. l. _____	Pli. f. s. h. E. _____	Autres traits caractéristiques : _____	
	Part ^{te} _____	Oruille droite. _____	Part. _____	Sig ^r dressé par M. _____	

Figura 3. Ficha biométrica de Francis Galton

1892. El policía argentino Juan Vucetich hace las primeras fichas dactilares del mundo. Vucetich determina, inicialmente, 101 rasgos de las huellas para clasificarlas en cuatro grandes grupos. Luego logró simplificar el método basándolo en cuatro rasgos principales: arcos, presillas internas, presillas externas y verticilos.

1901. Sir Edward Henry abre The Metropolitan Police Fingerprint Bureau en Scotland Yard. Su método, que todavía se aplica en la actualidad, asigna a cada huella un valor numérico.

1902. Comienza el uso sistemático de huellas dactilares en los Estados Unidos por la Comisión de la función pública de Nueva York, gracias al Dr. Henry P. Deforest.



1903. El sistema penitenciario de Nueva York implanta el primer uso sistemático de huellas dactilares en los EEUU para los criminales.

1904. La identificación por huellas dactilares comienza a utilizarse en la “Federal Penitentiary Leavenworth” en Kansas, en el departamento de Policía de St. Louis asistidos por un Sargento de la Policía Británica.

1908. La Marina de los EEUU introduce el uso de las huellas dactilares y, a partir de ese año, y durante los siguientes 25 años, más Agencias de Seguridad han incorporado el uso de huellas dactilares como medios de la identificación personal. Muchas de estas agencias comenzaron a enviar las copias de las huellas dactilares a la Oficina Nacional de Identificación Criminal, que fue establecida por la Asociación Internacional de Jefaturas de Policía.

1911. Thomas Jennings es el primer criminal estadounidense condenado gracias a sus huellas dactilares.

1918. El Sr. Edmond Locard escribe que si 12 puntos, detalles de Galton o minucias, son iguales, entre dos huellas dactilares, es suficiente como identificación positiva. De ahí nace el numero requerido de puntos necesarios para una identificación positiva. Algunos países han fijado sus propios estándares, que incluyen un número mínimo de puntos, pero no en los Estados Unidos.

1924. El Congreso de EEUU crea la división de Identificación del F.B.I. a través de la huella dactilar, formando el primer archivo de huellas dactilares de los EEUU.

1936. El oftalmólogo Frank Burch propone el iris como método de identificación y verificación de identidad.

1946. El F.B.I. ha procesado ya 100 millones de tarjetas de huellas digitales en archivos manualmente mantenidos.

1960. La NSA norteamericana comienza a investigar la identificación por reconocimiento de voz.

1971. Se alcanzan los 200 millones de tarjetas con huellas digitales, solo en Estados Unidos.

1972. Sale a la venta el primer dispositivo de identificación biométrica por huella dactilar para control de accesos en oficinas.

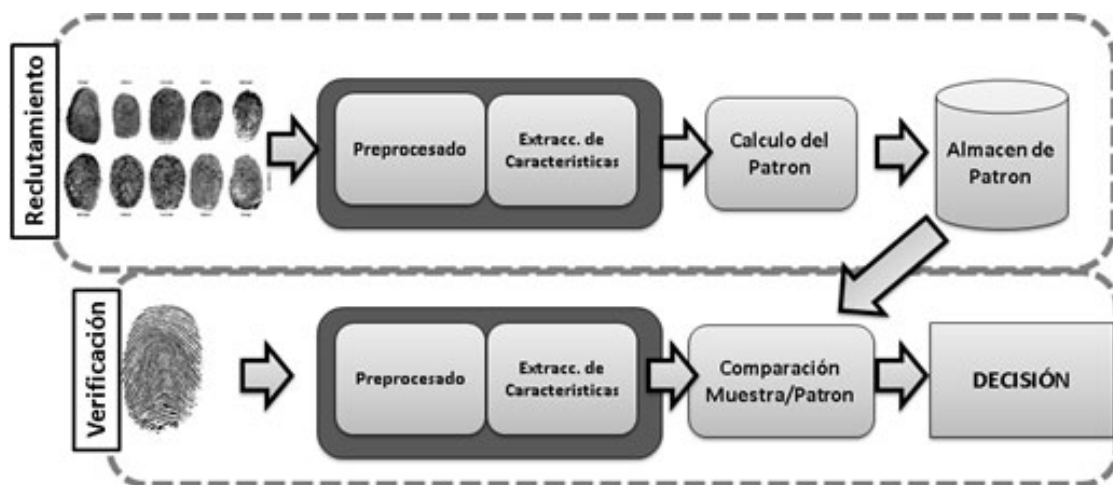
2001. El MIT dice que la biometría es una de las tecnologías emergentes que puede cambiar el mundo.

1.5. Partes de un sistema biométrico.

Las técnicas de identificación biométrica son muy diversas, ya que cualquier elemento significativo de una persona es potencialmente utilizable como elemento de identificación biométrica. Sin embargo, incluso con la diversidad de técnicas existentes, a la hora de desarrollar un sistema de identificación biométrica, se mantiene un esquema totalmente independiente de la técnica empleada. Los sistemas se basan en dos fases totalmente diferenciadas[3]:

A.- Reclutamiento: en esta fase, se toma una serie de muestras del usuario, y se procesan, para posteriormente extraer un patrón, el cual se almacenará y será el conjunto de datos que caracterizará a ese usuario. Si se captura más de una muestra, el patrón suele ser el resultado de una media de las características obtenidas. Este proceso se hace de forma supervisada, es decir, existe una persona encargada de controlar cómo se produce la captura de los datos, así como de asegurar la identidad de la persona que se está reclutando en el sistema. Además, se aprovecha esta fase para enseñar al usuario cómo funciona el sistema y aclararle todas las dudas que pudiera tener.

B.- Utilización: una vez que se tiene almacenado el patrón del usuario, éste puede utilizar el sistema con normalidad, y sus características son comparadas con el patrón almacenado, determinando el éxito o fracaso de esa comparación.



Pero cada una de las fases mencionadas, está basada en una serie de bloques que hacen que las características biológicas o de comportamiento del individuo acaben siendo un elemento que lo identifique. Estas fases son:

- **Captura:** se toman los datos biofísicos o de comportamiento del sujeto. La toma de los datos depende, evidentemente, de la técnica biométrica empleada, también se pueden encontrar muchas variaciones una misma técnica biométrica. Por ejemplo, la huella dactilar puede ser obtenida por cámara de vídeo, ultrasonidos, efecto capacitivo sobre un semiconductor o exploración por láser. Esta fase es muy importante ya que en ella está contenida la interfaz hombre máquina y el sensor para la captura de la información biométrica, esto repercute directamente en el rendimiento del sistema biométrico ya que un diseño pobre de la interfaz puede resultar en una tasa alta de fallos al adquirir la información. Una forma de medir la eficiencia de esta fase es con el error de adquisición (Tasa de error de adquisición, o FTA) el cual denota la proporción de veces en la que el dispositivo de captura falla al adquirir la característica biométrica.
- **Preprocesado:** en este bloque se adecuan los datos capturados para facilitar el tratamiento que tiene que realizar el siguiente bloque. Este bloque se encarga, dependiendo de la técnica, de tareas como: reconocer el inicio de una frase y medir el ruido de fondo, binarizar y hacer una extracción de bordes de la imagen, localizar la muestra,

rotarla y ampliarla (o reducirla), para que se encuentre entre los márgenes que reconoce el algoritmo siguiente, etc.

- **Extracción de Características:** se puede considerar el bloque más significativo de la técnica a utilizar. En esta fase, los datos son procesados y un conjunto de características discriminatorias son extraídas para representar los rasgos medidos, estas características forman una plantilla la cual es almacenada en una base de datos para su posterior uso. Es en este bloque en el que se fundamenta la capacidad del sistema de distinguir entre sujetos. Sin embargo, debido a distintas aproximaciones al problema, este bloque puede seguir orientaciones muy diversas, e incluso contradictorias, para la misma técnica, creándose distintos métodos dentro de una misma técnica. Por otro lado, en algunas ocasiones, el desconocimiento sobre las características que se deben extraer, lleva a utilizar técnicas basadas en Redes Neuronales, que mediante entrenamiento de las mismas, se intentan adecuar a los resultados esperados.
- **Comparación:** una vez extraídas las características de la muestra capturada, se han de comparar éstas con las previamente almacenadas, es decir, el patrón o plantilla. Lo más importante que hay que dejar claro cuando se habla de este bloque, es que no se trata de una comparación binaria (o de igualdad), sino que la variación de las muestras, por diferencias en la captura o leve variación de las características de sujeto, hacen que la comparación dé como resultado un puntaje o probabilidad de semejanza. Por tanto, para determinar el éxito o fracaso de la comparación, habrá que determinar un umbral de tolerancia en esa probabilidad. La comparación puede estar basada en cada una de las distintas posibilidades que ofrece la Teoría de Reconocimiento de Patrones: Métricas como la Distancia Euclídea, Distancia de Mahalanobis o Distancia de Hamming o Estadísticas utilizando funciones de distribución, clasificadores bayesianos, o técnicas basadas en modelado de problemas como Redes Neuronales, Modelos de Mezclas de Gaussianas, etc. Sobre los conceptos expuestos cabe hacer un par de puntualizaciones. La primera de ellas

tiene que ver con la elección del umbral, ya que si éste se incrementa, hará que el sistema se “relaje” y permita una mayor probabilidad de accesos por parte de personas no autorizadas (Tasa de Falsa Aceptación, o FAR), mientras que si se disminuye, el sistema se volverá muy restrictivo, aumentando la probabilidad de rechazo de personas autorizadas (Tasa de Falso Rechazo, o FRR). Por lo tanto, la elección del umbral dependerá del grado de seguridad, y amigabilidad hacia el usuario, que se le quiera dar al sistema. Estos dos valores (FAR y FRR) pueden ser observados de una mejor manera en una gráfica de compensación de error (Detection Error Tradeoff, o DET) la cual muestra FRR contra FAR en varios valores del umbral n en escala de la desviación normal. El modo en el que se hace el reclutamiento no es tampoco trivial. En algunas técnicas basta una única toma de los datos, mientras que en otras puede ser necesario tomar varias muestras y en distintas sesiones (días o semanas), tal y como ocurre, por ejemplo, en los sistemas basados en voz. A todo esto habrá que añadir que si el reclutamiento resulta muy pesado, los usuarios del sistema tenderán a rechazar el sistema de identificación, por lo que habrá que buscar una solución de compromiso entre la comodidad del usuario, y la obtención de un patrón óptimo. En el reclutamiento también se presenta un tipo de error conocido como error de reclutamiento (Tasa de error de reclutamiento, o FTE) el cual indica la proporción de usuarios que no pueden ser enrolados correctamente en el sistema biométrico.

C.- Reconocimiento / Autenticación: Hasta ahora se ha estado hablando siempre de Identificación Biométrica; sin embargo, la Identificación se puede realizar basándose en dos esquemas de funcionamiento del Sistema Biométrico: Reconocimiento y Autenticación:

- Reconocimiento: también llamado, en algunos textos, simplemente Identificación (lo cual llega a causar cierta confusión). Se basa en identificar a un usuario dentro de todos los usuarios que ya se encuentran en el sistema. Por lo tanto, se comparan las características extraídas con los patrones de todos los usuarios reclutados por el sistema. Este esquema de funcionamiento, necesario para muchas aplicaciones, tiene como inconvenientes la necesidad de una Base de

Datos de patrones (con los requisitos oportunos de capacidad de almacenamiento y seguridad de los datos) y la existencia de una red de comunicaciones, siempre online, que comunique los puestos de identificación con la Base de Datos. El resultado de la comparación puede ser: siempre positivo (es decir, se identifica siempre con el usuario que ha dado una probabilidad más alta), o puede indicar rechazos (si el usuario con la mayor probabilidad no supera un determinado umbral).

- Autenticación: también llamado sencillamente Verificación. Trata de responder a la pregunta: ¿es este sujeto la persona que dice ser? En este esquema de funcionamiento, el usuario, al que se le toman sus características biométricas, también comunica su identidad. El sistema se encarga, entonces, de comparar las características extraídas, con el patrón del usuario indicado. Si la comparación supera un determinado umbral de similitud, se considera que el usuario es el indicado, rechazando la comparación en caso contrario. El patrón del usuario puede estar almacenado en una Base de Datos, tal y como se hace en los sistemas de Reconocimiento, o, si el patrón es suficientemente pequeño, en un sistema portátil de información como puede ser una tarjeta. En este último caso no son necesarias ni la Base de Datos ni la red de comunicaciones de los sistemas de Reconocimiento.

D.- Medición del rendimiento: Uno de los aspectos más importantes para el funcionamiento de un sistema biométrico es su rendimiento, este se puede resumir utilizando medidas de un solo valor como la tasa de error igual (Equal Error Rate, o EER) y el valor dprima (Dprime value, o d').

1.6. Tipos de sistemas de identificación biométrica

En función de las características cuantificadas, es posible establecer dos grandes grupos. Las huellas dactilares, el iris, la retina, la geometría de la palma de la mano y el rostro, son ejemplos de características físicas o estáticas, las que formaran parte de la denominada biometría estática. Al conjunto de características, tales como

la firma, la dinámica del tecleo y voz se les conoce como conductuales o de comportamiento y se encuentran insertas dentro de la biometría dinámica.

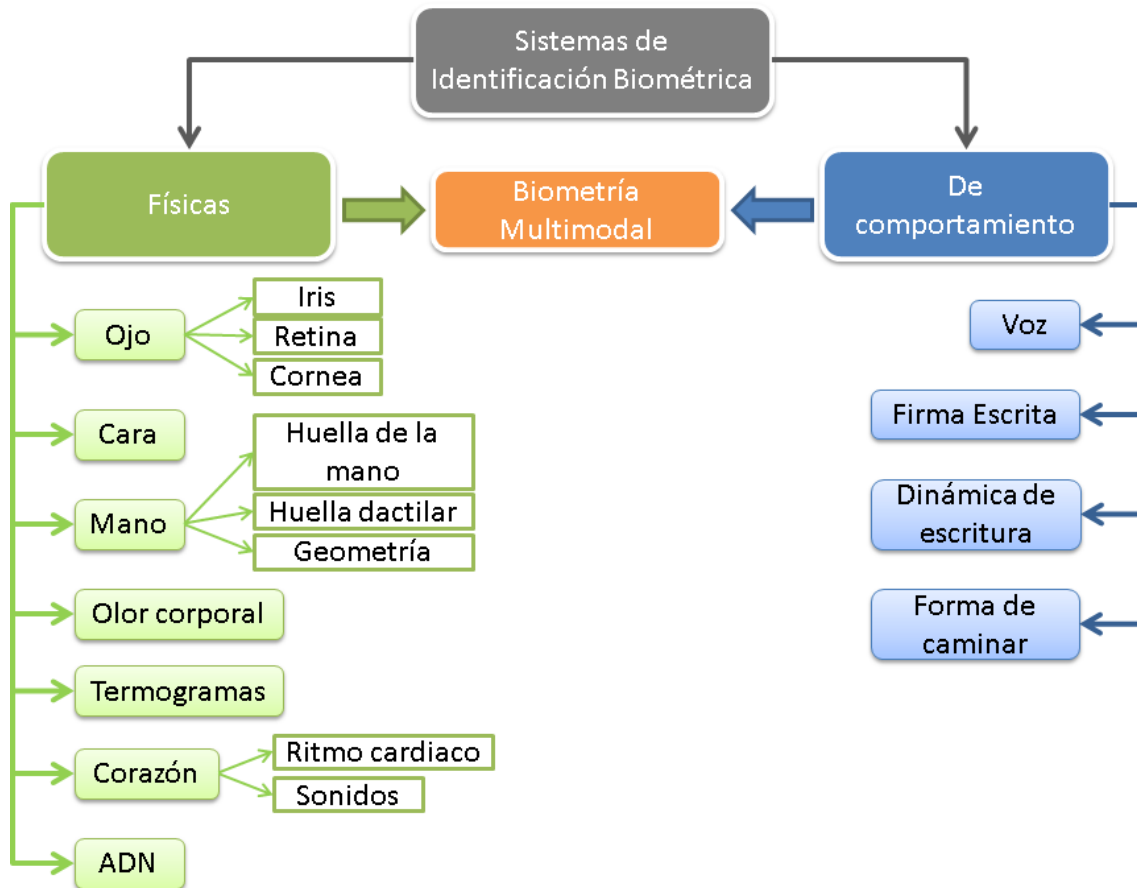


Figura 4. Diferentes técnicas de identificación

Para realizar otra división distinta podríamos diferenciarlas entre técnicas más usadas, menos usadas y técnicas incipientes. Dentro de las tecnologías más usadas, estarán contenidas la huella dactilar, reconocimiento facial, análisis del iris, reconocimiento de voz, firma escrita o manuscrita, termogramas de venas de rostro y manos y ADN.

Entre las menos usadas se encuentran las huellas de la palma de la mano, geometría de la mano, dinámica del teclado y análisis de retina. Por último las tecnologías incipientes son el análisis de la córnea, el ritmo cardiaco, los sonidos del corazón, el olor corporal y la forma de caminar.



Más allá de las incipientes, es decir técnicas en estudio y desarrollo todavía, están la dinámica del ratón, pulso de la sangre, crestas de las articulaciones de los nudillos, arrugas del dedo, perfil de presión de la mano, reconocimiento dinámico de asimiento, transmisión de sonido de los huesos y por último firma biodinámica.



2

ADN



2.1. Introducción

Al hablar del ADN y de su historia deberíamos diferenciar entre la historia de la propia molécula y su descubrimiento a lo largo del S.XX, de lo que ha sido el anhelo de grandes científicos y pensadores en su afán por explicar la herencia de caracteres humanos y la singularidad de rasgos y características.

En la primera parte de este capítulo se repasará esa parte histórica que, si tenemos que inevitablemente está ligada al desarrollo y evolución de la genética y no tanto del ADN. En ella destacarán los nombres de los filósofos y pensadores griegos, Schwann, Darwin o el mismo Mendel. Cronológicamente después de Mendel, todos los estudios sobre genética fueron confluyendo, accidentalmente o no, en el estudio de las moléculas de ADN. Sufriendo como en otros muchos aspectos de la ciencia una aceleración sin parangón durante el S.XX que acabaría en el año 2.000 con el primer borrador del genoma humano.

2.2. Historia

A pesar de tratarse de una disciplina científica con apenas 150 años de desarrollo, el interés en los fenómenos biológicos relacionados con la Genética puede remontarse a la Era Neolítica (alrededor de 10.700 a 9.400 AC) cuando el crecimiento de la población demandó cambios en los métodos ancestrales para la obtención de alimentos mediante la recolección, caza y pesca.[4]

Entonces, dio comienzo (principalmente en Medio Oriente) el desarrollo de la agricultura y la ganadería con la siembra de plantas y la cría de animales domésticos. Pronto se descubrió que se podían modificar los cultivos y los animales mediante su reproducción selectiva cuando rasgos (fenotipos) deseables de los progenitores eran transmitidos a su descendencia (herencia).

En paralelo y desde tiempos remotos, ya se habían observado dichos fenómenos de herencia en los humanos; y el describir y entender sus mecanismos en Occidente ocupó la mente de los filósofos griegos. Entre ellos, Leucipo de Mileto (Siglo V AC), Anaxágoras (500-428 AC) y Demócrito (460-ca 370 AC) observaron que,

virtualmente, todas las partes del cuerpo exhiben diferencias hereditarias. Así concluyeron que cada órgano y estructura del cuerpo producía pequeños sedimentos (más tarde llamados gémulas) que por vía sanguínea llegaban a los órganos reproductores desde donde eran pasados al embrión en el momento de la concepción.

En el marco de este concepto, que más tarde se conocería como pangénesis, Anaxágoras creía que un perfectamente preformado y diminuto humano (homúnculo) preexistía en el aparato reproductor masculino y era transmitido a la madre durante la procreación para su desarrollo embrionario en la matriz.

Por aquella época se creía que sólo el hombre contribuía a la herencia de sus descendientes y también que podía transmitir caracteres adquiridos durante su vida a su progenie. El filósofo griego Aristóteles (384-322 AC) afirmaba que ambos sexos contribuían a los rasgos de la descendencia, considerando incorrecta la hipótesis del homúnculo. Rechazó también el concepto de pangénesis, señalando además, que en ocasiones los individuos se asemejan más a sus ancestros que a sus propios padres.

A pesar que durante la Antigua Roma (hasta la caída del Imperio Romano de Occidente en 476 AD) se contribuyó poco al entendimiento de la herencia, durante ese período se desarrollaron exitosamente, por el método de prueba y error, un cierto número de técnicas de cría de animales y de crecimiento de plantas. Se avanzaría muy poco en el entendimiento de la Genética durante los próximos 1000 años. Las antiguas ideas erróneas sobre pangénesis y herencia de caracteres adquiridos, junto con las técnicas empíricas de cría de animales y plantas, sobrevivirían durante el surgimiento de la ciencia moderna en los siglos XVII y XVIII de nuestra era, llegando a tener gran influencia hasta fines del siglo XIX

En 1665, empleando los primeros microscopios, , Robert Hooke (naturalista inglés, 1635-1703) estudió el origen de la baja densidad del corcho mediante la observación de delgadas láminas. Ahí descubre que el vegetal está constituido por celdas organizadas espacialmente de una manera similar a un panal de abejas. No pudo demostrar el significado biológico de estas celdillas en los seres vivos, por cuanto lo que estaba observando eran células vegetales muertas que retenían su característica forma poligonal.

Antón van Leeuwenhoek (fabricante de lentes holandés, 1632-1723) fue probablemente la primera persona en observar bacterias (organismos unicelulares) y

otros microorganismos. En 1674 observa protozoarios; en 1677 descubre los espermatozoides humanos y de otros animales (a los que llamó animálculos). Entusiastas practicantes de la microscopía durante esa época creyeron ver que un minúsculo homúnculo reside en el espermatozoide humano, reavivando antiguas creencias en preformacionismo de hace más de 2000 años.

Durante la misma década de 1670, Régnier de Graaf (médico y anatomista holandés, 1641-1673) describió por primera vez el folículo ovárico, la estructura en la cual se forma los ovocitos, células precursoras del óvulo humano. Aunque el óvulo real no se visualizó hasta pasados otros 150 años, su existencia fue rápidamente aceptada. De hecho, de Graaf atrajo a una escuela de adeptos, liderados por Marcello Malpighi (anatomista y biólogo Italiano, 1628-1694), llamados ovistas, que creían que era el óvulo femenino el que contenía el futuro ser humano y no el espermatozoide como sostenía la escuela que se dio en llamar animalculista o spermista. La controversia entre las dos escuelas se extendió por décadas Otra noción previa al desarrollo científico de la genética establecía equivocadamente que la descendencia adquiriría una herencia mezcla de los caracteres aportados por los padres.

Karl Reinhold Ernst von Baer (naturalista alemán del Báltico, 1792-1876) descubre en 1827 los óvulos mamíferos, cuya existencia fue predicha por Régnier de Graaf unos 150 años antes. Robert Brown (botánico escocés, 1773-1858) describe en 1831 el núcleo de células eucariotas.

Matthias Jakob Schleiden (botánico alemán, 1804-1881) y su compatriota Friedrich Theodor Schwann (naturalista, 1810-1882) establecen en 1839 la teoría celular: todos los animales y plantas consisten en agregados de células, las que constituyen la mínima unidad de vida. Proponen que todo organismo comienza con una única célula y que las criaturas multicelulares se forman por sucesivas divisiones celulares.

Charles Darwin (naturalista inglés, 1809-1882) enuncia en 1859 su famosa teoría sobre el origen y evolución de las especies. Darwin adoptó el modelo de pangénesis para la herencia, lo que le impidió desarrollar la base genética subyacente en su teoría de la evolución a través de la selección natural.

Uno de los grandes problemas que tenía el evolucionismo, la pangénesis y por lo tanto el Darwinismo era el de la herencia. . Para que exista evolución es necesario

que las nuevas características del individuo pasen a la siguiente generación. Sin embargo, hasta la llegada de la genética a principios del XX, no se sabía nada de los mecanismos de la herencia: ¿Qué heredamos, por qué y cómo?

Para explicar esto, Darwin concibe su tristemente célebre teoría de la pangénesis. Cuando Darwin presentó el Origen de las especies muchos científicos se convirtieron rápidamente al evolucionismo (al contrario de lo que suele pensarse). Lo que realmente costaba aceptar era el mecanismo de selección natural como motor evolutivo. El lamarckismo tenía menos problemas para explicar las cosas. Mientras que la selección natural necesita muchísimo tiempo para generar nuevos seres (recordemos la objeción de Lord Kelvin al tiempo evolutivo) ya que funciona mediante variaciones fortuitas, el lamarckismo es mucho más rápido (el uso desarrolla el órgano) y no necesita el azar (la idea de que seres tan complejos como un mamífero se crearan a base de errores azarosos es algo que todavía da mucho que hablar). Así, en el último tercio del siglo XIX casi todo el mundo era lamarckista... ¡Incluso el propio Darwin!

Para explicar qué es lo que se hereda, Darwin propone la pangénesis. Esta teoría sostiene que cada órgano y tejido del cuerpo del ser vivo genera una especie de células que se llaman gémulas. Estos sedimentos van a parar al torrente sanguíneo y de ahí a los gametos sexuales, por lo que son lo que realmente se hereda. Cada vez que un órgano se desarrolla con su uso, éste genera más gémulas, lo que provoca que todos los desarrollos orgánicos que un organismo tenga en vida, van a parar a sus células sexuales. De este modo, si un individuo pasa toda la vida haciendo pesas y sus bíceps se desarrollarán, emitirán más “gémulas musculares del bíceps” las cuales heredarán sus hijos. Si sus bíceps son muy fuertes, los de sus hijos lo serán también.

Como es fácil ver, esta teoría explica perfectamente el lamarckismo. Lo que un individuo desarrolle en su vida pasará a sus descendientes. Paradójicamente, la pangénesis fue la carta de defunción del darwinismo (es decir, de la apuesta por la selección natural) hasta la llegada de la teoría sintética o del neodarwinismo en pleno siglo XX. Darwin murió siendo lamarckista, lo cual no hace más que mostrar su honestidad intelectual. Prefería creer en una teoría que no era suya si la consideraba más verdadera.

Diez años después de la muerte de ambos, August Weissmann (1834-1914) va a ser el último gran defensor del darwinismo en el Siglo XIX con su teoría del plasma germinal, postura que combatirá el lamarckismo y será clara precursora de la genética que estaba ya a punto de nacer.[5]

Casi coetáneos y por lo tanto trabajando en paralelo Gregor Johann Mendel (monje católico y naturalista austríaco, 1822-1884) establece en 1865 las leyes de la herencia, fundando la disciplina científica de la Genética. Los trabajos de Mendel durante el período 1856-1863 precisan y cuantifican resultados de sus predecesores, valiéndose de:

- 1) Numerosos y precisamente controlados experimentos de fertilización cruzada entre diversas variedades de guisantes (usó unas 28.000 plantas) con siete bien determinadas características fenotípicas, tales como el color (amarillas o verdes) y la textura (lisas o rugosas) de las semillas, el color de las flores (blancas o púrpuras), etc.
- 2) Seguimiento de los patrones de herencia a lo largo de varias generaciones.
- 3) Empleo de conceptos simples de matemática combinatoria y estadística para derivar las leyes de la herencia.

La genética mendeliana ha sido para la biología lo que en su día fueron las leyes de Newton para la física clásica.[6]

¿Por qué el hijo se parece a la madre en ciertos rasgos y al padre en otros? ¿Por qué ciertos caracteres parecen saltar de una generación y el niño se parece más a su abuelo que a su padre? Preguntas similares han sido desde épocas remotas de una gran importancia práctica para los cultivadores de plantas y criadores de animales que intentaban obtener variedades con ciertas características beneficiosas para el ser humano.

Para dar respuestas a estas y muchas más preguntas, Mendel enunció 3 leyes sobre la genética, que como ya hemos señalado, son para la biología como las de Newton o Kepler para la física, estas leyes son:

- Primera Ley: “Principio de uniformidad”

“Al cruzar dos razas puras, la descendencia será heterocigótica y dominante”

- Segunda Ley: “Principio de distribución independiente”

“Al cruzar dos razas híbridas, la descendencia será homocigótica e híbrida al 50% “

- Tercera Ley: “Principio de la independencia de los caracteres”

“Al cruzar varios caracteres, cada uno de ellos se transmite de manera independiente”

En 1865 Mendel presentó su trabajo sobre la herencia ante la Natural History Society de Brunn. Por desgracia fue escasamente estimado, especialmente para Darwin, ya que de haber profundizado en el trabajo de Mendel podría haber consolidado su teoría de la evolución.

Debido a la indiferencia de la comunidad científica y a su nombramiento como abad, en 1868 interrumpió sus investigaciones. Poco tiempo antes de su fallecimiento, en 1884, declaró que algún día el mundo apreciaría su trabajo y si bien no vivió lo suficiente para ver confirmado su aserto, así fue, siendo considerado hoy el padre de la genética.

Al mismo tiempo la meiosis celular fue descubierta y descrita, exactamente en 1876 por primera vez por Oscar Hertwig (zoólogo alemán, 1849-1922). Fue descrita (a nivel de cromosomas) nuevamente en 1883 por Edouard Joseph Marie Van Beneden (zoólogo belga, 1846-1910). Sin embargo, la relevancia de la meiosis para la reproducción y herencia fue revelada ya en 1890 por Friedrich Leopold August Weismann (biólogo evolucionista alemán, 1834-1914) quien observó que se necesitan dos divisiones celulares para transformar una célula diploide en cuatro células haploides manteniendo el número de cromosomas.

Hugo de Vries (botánico holandés, 1848-1935), Carl Franz Joseph Erich Correns (genetista y botánico alemán, 1864-1933) y Erich von Tschermak-Seysenegg (agronomo austríaco, 1871-1962) redescubren independientemente en 1900 las Leyes de Mendel.

Hasta mediados del siglo XX no se sospechaba que el ácido desoxirribonucleico, ADN, fuera la molécula capaz de asegurar la transmisión de los caracteres hereditarios de célula a célula, generación tras generación. Su limitada variedad química no permitía suponer que poseyera la versatilidad y ductilidad necesarias para almacenar la información genética de los seres vivos. Por ello solo algunos de los más renombrados científicos pararon en su estudio, mientras que otros continuaban los caminos de Mendel, ya fuese redescubriéndolo, lo que da una muestra de la importancia de su hallazgo, o reforzando sus descubrimientos al corroborarlos en células y sus desarrollos.

El biólogo suizo Johann Friedrich Miesscher, identifica en 1868 el ADN como un ácido débil, constituyente químico del núcleo de células eucariotas, obtenidas de los glóbulos blancos de la sangre en pus colectado en hospitales. Después de este descubrimiento, al año siguiente utilizó primero alcohol caliente y luego una pepsina enzimática, que separa la membrana celular y el citoplasma de la célula, el científico quería aislar el núcleo celular, concretamente en los núcleos de las células del pus obtenidas de los vendajes quirúrgicos desechados y en la esperma del salmón, sometió a este material a una fuerza centrífuga para aislar a los núcleos del resto y posteriormente analizó dichos núcleos químicamente.

Walther Flemming (médico y biólogo cito-genetista alemán, 1843-1905) publica primero en 1878 y más tarde en su libro seminal de 1882 sobre “Sustancia celular, núcleo y división celular” una descripción detallada de las diversas fases durante el proceso de división celular (mitosis). La meiosis es un tipo especial de división celular necesaria en la reproducción sexual de organismos eucariotas (con células nucleadas). Las células producidas por meiosis se llaman gametos. En muchos organismos, incluyendo todos los animales y plantas terrestres (exceptuando algunos otros grupos, tales como los hongos), las gametos son llamadas también células espermáticas y óvulos.[7]

Tuvieron que pasar casi tres décadas, hasta que Robert Feulgen, en 1914, describió un método para revelar por tinción el ADN, basado en el colorante fucsina. Se encontró, utilizando este método, la presencia de ADN en el núcleo de todas las células eucariotas, específicamente en los cromosomas.

Durante la década de 1920, la mayoría de los trabajos sobre la estructura química del ADN fueron desarrollados en un solo laboratorio por el eminente bioquímico ruso-estadounidense Phoebus A. Levene (1869-1940). Este científico ya había identificado la ribosa como uno de los azúcares de los ácidos nucleicos. No todos los ácidos nucleicos poseían ribosa y los que la contenían se llamaron ácido ribonucleico o ARN. Posteriormente, en 1929, Levene demostró que el ADN contenía otro azúcar de cinco carbonos, la desoxirribosa, que difería levemente de la ribosa. De esta manera, este ácido nucleico se llamó ADN (ácido desoxirribonucleico). Así, Levene demostró que el ADN está formado por desoxirribosa, un grupo fosfato y cuatro bases nitrogenadas: adenina y guanina (purinas) y timina y citosina (pirimidinas). Dado que en todas las muestras que analizó, las proporciones de las bases nitrogenadas eran aproximadamente iguales, Levene concluyó que las cuatro bases nitrogenadas debían estar presentes en el ácido nucleico en cantidades iguales. Más aún, supuso que estas moléculas debían estar agrupadas en ramilletes de cuatro, un tetranucleótido, según lo llamó, que se repetía una y otra vez a lo largo de la molécula. Aunque esta deducción era incorrecta, dominó el pensamiento científico sobre la naturaleza del ADN por más de una década.

En el año 1928 Frederick Griffith investigando una enfermedad infecciosa mortal, la neumonía, estudió las diferencias entre una cepa de la bacteria *Streptococcus pneumoniae* que producía la enfermedad y otra que no la causaba. La cepa que causaba la enfermedad estaba rodeada de una cápsula (también se la conoce como cepa S, del inglés smooth, o sea lisa, que es el aspecto de la colonia en las placas de Petri). La otra cepa (la R, de rugosa, que es el aspecto de la colonia en la placa de Petri) no tiene cápsula y no causa neumonía.[8]

Griffith inyectó las diferentes cepas de la bacteria en ratones. La cepa S mataba a los ratones mientras que la cepa R no lo hacía. Luego comprobó que la cepa S, muerta por calentamiento, no causaba neumonía cuando se la inyectaba. Sin embargo cuando combinaba la cepa S muerta por calentamiento, con la cepa R viva, es decir con componentes individuales que no matan a los ratones e inyectaba la mezcla a los ratones, los ratones contraían la neumonía y morían.

Las bacterias que se aislaban de los ratones muertos poseían cápsula y, cuando se las inyectaba, mataban otros ratones. Frederick Griffith fue capaz de inducir la transformación de una cepa no patogénica *Streptococcus pneumoniae* en

patogénica. Griffith postuló la existencia de un factor de transformación como responsable de este fenómeno.

En 1952, un conjunto de experimentos simples, pero ingeniosos, fueron llevados a cabo por los bioquímicos estadounidenses Alfred D. Hershey (1908-1997) y Martha Chase. Prepararon dos muestras separadas de virus, una contenía ADN marcado con un isótopo radiactivo y la otra contenía proteína marcada con otro isótopo radiactivo diferente. Cultivaron los dos tipos de virus por separado, infectaron bacterias con los dos grupos de fagos y analizaron las bacterias en busca de radiactividad. A partir de los resultados obtenidos, Hershey y Chase concluyeron que el material genético viral era el ADN y no la proteína, lo cual reforzó las observaciones realizadas anteriormente por Avery.

Ese sería el material hereditario (factor transformador de Griffith). Dado que el ADN contiene fósforo (P) pero no azufre (S), ellos marcaron el ADN con fósforo-32 radioactivo. Por otra parte, las proteínas no contienen P pero sí S, y por lo tanto se marcaron con azufre-35. Hershey y Chase encontraron que el S-35 queda fuera de la célula mientras que al P-32 se lo encontraba en el interior, indicando que el ADN era el soporte físico de la herencia.

Un año después de los experimentos de Hershey-Chase apareció en la revista *Nature*, un artículo conjunto de Watson y Crick que narraba de forma cautelosa el descubrimiento que habían realizado; comenzaba con estas palabras: "Deseamos sugerir una estructura para la sal del ácido desoxirribonucleico (ADN). Esta estructura posee nuevas características que son de considerable interés biológico".

Eligiendo los datos más relevantes de un cúmulo de información y analizando con recortes de cartón y modelos de alambre y metal, fueron capaces de desvelar la estructura de la doble hélice de la molécula del ácido desoxirribonucleico, ADN, y formularon los principios de almacenamiento y transmisión de la información hereditaria. Este hallazgo les valió el premio Nobel (1962), que compartieron con M.H.F. Wilkins.

2.3. Uso del ADN como identificador biométrico

A mediados del siglo XX gracias al descubrimiento del ADN y de su estructura y al posterior avance en las técnicas de análisis de dicha molécula, la identificación biométrica evolucionó considerablemente hasta el punto de que hoy en día puede hablarse de una nueva subespecialidad dentro de la Genética Forense, puesto que en la actualidad no solo se emplean marcadores sanguíneos sino también muchos otros. Aunque la ciencia poseía las herramientas necesarias para el estudio del ADN, su aplicación en la resolución de casos judiciales no se produjo hasta 1985.

Esta área de investigación tiene sus tres principales áreas de impacto en:

- Investigación de la paternidad: Impugnación por parte del supuesto padre o reclamación por parte de la madre y/o del hijo.
- Criminalística: Asesinato y delitos sexuales. Se analizan restos orgánicos humanos.
- Identificación: Restos cadavéricos o personas desaparecidas.

2.3.1. Marcadores genéticos que se usan en la identificación biométrica

Los marcadores genéticos que se utilizan actualmente están constituidos por regiones de ADN repetitivo que presentan una gran variabilidad de tamaño entre los distintos individuos de una población. Estas regiones, se conocen con el nombre de regiones polimórficas. El principio básico de estos polimorfismos genéticos de estas regiones reside en la variación del número de veces que se repite en tándem una secuencia determinada (una repetición en tándem es una secuencia corta de ADN que se repite consecutivamente, en un locus específico). Según esto se clasifican en:

VNTR (acrónimo inglés: Variable Number of Tandem Repeats: número variable de repeticiones en tándem). Son locus cuyos alelos difieren por tener un número variable de repeticiones en tándem. Un ejemplo de VNTR en humanos es una secuencia de ADN de 17 pb que se repite entre 70 y 450 veces en el genoma. El número total de pares de bases en ese locus puede así variar entre 1190 y 7650.

Ventajas de estos polimorfismos:

Son muy variables en la población: los perfiles de ADN varían de una persona a otra, por tanto podemos afirmar que no existen dos personas con el mismo número de repeticiones en tándem. Cuando se comparan los perfiles de un solo locus VNTR para individuos no relacionados entre sí, habitualmente son diferentes. No obstante, es posible que dos personas tengan el mismo perfil en uno o dos **loci** por casualidad. Sin embargo, la probabilidad de que dos personas tengan el mismo perfil de ADN en 4, 5 o 6 loci VNTR diferentes es extremadamente baja. Cuando se usan los perfiles de ADN con fines médico-legales, se analizan de 4 a 6 loci VNTR diferentes.

El número de repeticiones es heredable. Dado que recibimos un cromosoma de cada tipo del padre y otro de la madre, tendremos un número de repeticiones proveniente de éste y otro de ésta.

En forma de esquema, consideremos los individuos A y B. Supongamos que existen dos hipotéticos VNTR, uno de ellos en una cierta región del cromosoma 6 y otro en el 15.

Existen dos tipos de polimorfismos de repetición de uso en diagnóstico genético, los VNTR-minisatélites y los VNTR-microsatélites.

Los VNTR-minisatélites o MVR (minisatellite variant repeats) son loci que corresponden a secuencias de ADN de unas pocas decenas de nucleótidos (sobre 30 pares de bases) repetidas en tándem. El número de dichas repeticiones varía de cromosoma a cromosoma. La singularidad más especial de este tipo de polimorfismos está en que cada loci puede presentar muchos alelos distintos (tantos como repeticiones), sin embargo presentan el inconveniente que no están distribuidos por todo el genoma y por lo tanto solo pueden ser utilizados en el diagnóstico de un número muy reducido de casos. Los VNTR-minisatélites han encontrado su máxima aplicación en la determinación de la paternidad y en los protocolos de identificación genética en el ámbito judicial. Cuando se habla de huellas dactilares del ADN se está hablando de este tipo de polimorfismo.

Los VNTR-microsatélites o STR (short tandem repeats) Corresponden a la repetición en tándem de secuencias de entre 2 y 5 nucleótidos. Los microsatélites presentan dos características que los hacen ideales para su uso. En primer lugar,

están distribuidos de forma casi homogénea por todo el genoma y en segundo lugar, presentan un número elevado de alelos con frecuencias similares entre sí, de forma que la probabilidad de que un individuo sea heterocigoto es muy elevada (presentan una alta heterocigosidad).[9]

Estas regiones hipervariables pertenecen al denominado “ADN no codificante” son regiones no conservadas y por tanto no sujetas a una presión selectiva intensa, originando un gran número de variantes, que son los que denominamos alelos. Estas zonas llamadas polimórficas son las que interesan en genética forense para poder diferenciar unas muestras de otras. Por tanto, no es interesante analizar la molécula de ADN completa, principalmente por dos razones:

Se tardaría mucho tiempo y la mayor parte de la molécula es común en todos los humanos y no se podrían distinguir.

2.3.2. Tipos de ADN sometidos a estudio de marcadores genéticos

2.3.2.1 ADN nuclear

Siempre que sea posible se realizará el análisis de polimorfismos de este ADN, pues son los que más información darán en cuanto a la identidad de la muestra. Se encuentra en el núcleo, y se hereda mitad de la madre y mitad del padre, con excepción del ADN presente en el cromosoma Y masculino, que sólo se hereda por línea paterna.

Las características más importantes del ADN nuclear para identificación humana son:

- Es único para cada persona, excepto en el caso de los gemelos univitelinos.
- Permite establecer relaciones entre hermanos, primos, abuelos nietos, y otros grados de parentesco, porque, otros tipos de ADN sólo permitirán establecer relaciones de paternidad (cromosoma Y) y de maternidad (ADN mitocondrial).

- Sirve para determinar el sexo de la persona de la que proviene una muestra porque se puede establecer la presencia de XX o XY en el par 23.
- Posee un enorme potencial de estudio, por la gran cantidad de ADN no codificante y las regiones tipo STR y SNP.

Uno de los fragmentos de ADN nuclear más estudiados es la amelogenina. Se trata de un marcador muy útil porque informa sobre el sexo del individuo al que pertenece la muestra.

La amelogenina es un locus localizado en una región homóloga de los cromosomas sexuales. Existe una diferencia de 6 pares de bases entre el tamaño del alelo presente en el cromosoma X y el Y, que se debe a una pequeña delección en el cromosoma X. El resultado de la amplificación por PCR (*polymerase chain reaction*) de este locus en un ADN femenino (XX) será de una única banda, mientras que si el ADN es masculino (XY), el resultado serán dos bandas de distinto tamaño.

No obstante, hay que tener en cuenta que, aunque ocurre con muy baja frecuencia, se ha detectado la existencia de delecciones en esta región del cromosoma Y, de tal forma que una muestra masculina podría asignarse erróneamente como femenina. En este caso, el análisis de marcadores específicos del cromosoma Y permitirían una correcta asignación del sexo. El inconveniente que presenta el estudio de marcadores concretos del cromosoma Y, es que se heredan sin cambios significativos en una misma familia de padre a hijo, de modo que permiten identificar a un varón de la familia pero tendremos que estudiar otros marcadores para distinguir entre abuelo, padre, hijo, etc.[10]

Después de una extracción de ADN en muestras que se encuentran en muy mal estado de conservación, se obtienen fragmentos de sólo 100-200 nucleótidos debido a su estado de degradación (rotura), con el agravante de que muchas veces estas muestras van acompañadas de ADN bacteriano. Por el contrario las muestras de tejido fresco proporcionan fragmentos de ADN de más de 10.000 nucleótidos.

Pero existen situaciones en las que es recomendable el análisis de otros tipos de polimorfismos como son los polimorfismos de ADN mitocondrial y polimorfismos ligados al cromosoma Y.

2.3.2.2 ADN mitocondrial

Existen numerosas mitocondrias en cada célula (entre 250 y 1000 según el tipo celular, las necesidades metabólicas y el tipo funcional) y varias copias de ADN mitocondrial en cada mitocondria, es decir, existen mayor cantidad de copias de ADNmt que de ADN nuclear por célula, de forma que hay una sola copia de ADN nuclear en una célula mientras que puede haber miles de copias de ADNmt. Este hecho hace que en muestras forenses muy críticas (con escasa cantidad de ADN o con ADN en mal estado) tenga más éxito el análisis de ADNmt que el de ADN nuclear. Sin embargo, el ADNmt presenta una peculiaridad, se hereda única e íntegramente de la madre, sin que exista ninguna combinación con el material del padre. Por este motivo se dice que es un genoma haploide.

La causa de que no exista mezcla con el material del padre es la siguiente: las mitocondrias del espermatozoide se localizan en el cuello (entre la cabeza y la cola), con el fin de aportar la energía que esta célula necesita para mover la cola y desplazarse en busca del óvulo. Al producirse la fecundación solo penetra en la célula femenina la cabeza del espermatozoide (con el ADN nuclear) quedando fuera la cola y el cuello, y con él todas las mitocondrias. Esto hace que el padre no aporte dicho material a su descendencia.

Las características básicas que lo hacen útil en investigación forense y antropológica son:

- El elevado número de copias por célula que hace alguna de ellas resista las condiciones adversas sin ser degradada.
- Su pequeño tamaño. Esto facilita la conservación en el tiempo a pesar de que las condiciones no sean apropiadas: al ser más pequeño que el ADN nuclear la probabilidad de verse afectado es menor.

Estas 2 características garantizan la estabilidad postmortal y una mayor resistencia que el nuclear.

Pero también tiene desventajas o puntos débiles como:

- No es específico de cada persona, sino que se asocia a todas las personas que proceden de la misma madre, abuela materna, etc.

- Sólo es útil cuando se trata de hacer estudios por vía materna, de modo que permite identificar a cualquier persona (hombre o mujer) frente a su madre, no frente a su padre.
- Presenta gran dificultad técnica por lo que restringe su uso a laboratorios especializados.

Este tipo de ADN se utiliza sobre todo en los casos siguientes:

- 1) Cuando existe una gran degradación de las muestras por las malas condiciones de conservación en que permanecieron hasta que fueron encontradas en lugar del crimen o por la antigüedad que tienen. En este caso el ADN mitocondrial se encontrará en mejor estado que el nuclear debido a su mayor número de copias por célula. Tal es el caso de restos óseos y dientes antiguos o sometidos a condiciones extremas.
- 2) Cuando la cantidad de muestra de que se dispone es mínima (pelos sin bulbo por ejemplo). Un pelo con bulbo caduco o un fragmento de pelo contendrá una cantidad de ADN nuclear tan escasa que en principio los análisis de estas muestras mediante ADN nuclear resultará negativo.
- 3) En la identificación de restos biológicos y el establecimiento de una relación familiar cuando no se dispone de los progenitores y no queda más remedio que realizar una comparación con familiares más lejanos. Si se trata de familiares vía materna tendrán exactamente el mismo ADN mitocondrial aunque se trate de familiares lejanos. Un estudio de ADN nuclear en estos casos sería poco informativo ya que cuanto más alejada sea su relación familiar, menos alelos compartirán.
- 4) Cuando existe un sospechoso en un hecho delictivo pero se dispone de muestra de la cual no se conoce su procedencia, se puede recurrir al estudio del ADN mitocondrial de un familiar relacionado matrilinealmente para excluirlo.

2.3.2.3 Polimorfismos del cromosoma Y

El cromosoma Y sólo existe en varones y todos los individuos varones emparentados por línea paterna comparten el cromosoma Y (casi en su totalidad) pues se hereda directamente de padres a hijos sin mezclarse con ningún material procedente de la madre. Por tanto, sólo es posible identificar linajes paternos mediante

el estudio de su cromosoma Y, mientras que no es posible identificar individuos. Respecto a los polimorfismos del cromosoma Y se analizan microsatélites (STRs).

Los principales problemas derivan de las características hereditarias del cromosoma Y:

- No es único de cada persona, sino que es común para todos los pertenecientes a un linaje paterno común.
- Sólo se puede aplicar a los hombres de modo que en un estudio de paternidad, por ejemplo, no sirve para determinar si un hombre es padre de una mujer.

Existen varios casos especiales en los cuales el análisis de los polimorfismos del cromosoma Y son de gran utilidad:

- Casos de paternidad: Casos de paternidad en los que no se dispone de material biológico de la madre. Nos bastará con disponer de la muestra del padre y compararla con la del presunto hijo para comprobar si ambas presentan idénticos polimorfismos Y. En casos complejos en los que falta el padre, se puede usar una muestra del abuelo.
- Casos de mezclas en agresiones sexuales: Agresiones en las que el semen del sospechoso varón se encuentra mezclado con células de una víctima mujer: los polimorfismos del cromosoma Y son detectados de forma más sensible en el ADN de un individuo a pesar de que éste se encuentre inmerso en una gran cantidad de ADN femenino. Con marcadores nucleares esto no ocurre pues se detecta antes el material femenino sobre todo si la cantidad de células epiteliales femeninas es muy superior al número de espermatozoides. Además, el uso de polimorfismos de ADN del cromosoma Y permite incluir o excluir a un sospechoso cómodamente.
- Delitos en los que el agresor es un individuo azoospermico: los individuos azoospermicos tienen ausencia de espermatozoides en el eyaculado. Los espermatozoides son la mayor fuente de ADN en las muestras de semen, por lo que un individuo azoospermico tiene mucho menos ADN seminal para el análisis. La cantidad de ADN por mililitro (mL) en el eyaculado de un individuo espermico es aproximadamente

de 450 microgramos (μgr) en los espermatozoides y de 30 μgr en los leucocitos y células epiteliales. Por ello, en un individuo azoospermico, el contenido de ADN es aproximadamente de sólo el 6.3% del contenido en un individuo espermico. Por las mismas razones que en el caso anterior, es posible la detección de ADN de las células epiteliales y los leucocitos en eyaculados de individuos vasectomizados aunque se encuentre mezclado con ADN de la víctima.

- Agresiones sexuales múltiples: el uso de los microsatélites del cromosoma Y en estos casos permite determinar el número mínimo de agresores.
- Otros tipos de mezclas: En mezclas de sangre-sangre, o de sangre-saliva, o de sangre-pelos, el cromosoma Y es una herramienta de trabajo que puede aportar valiosa información.
- Como herramienta de «screening»: En casos de agresión sexual: los polimorfismos Y pueden servir para relacionar rápidamente estos casos (bases de datos) y excluir sospechosos de manera rápida antes de profundizar en marcadores autosómicos.
- En grandes catástrofes: Cuando en una catástrofe aparece un gran número de cadáveres puede ser interesante clasificarlos según sus polimorfismos Y para poder discriminar qué cadáveres habrá que cotejar con cada familia antes de realizar los estudios de ADN nuclear autosómico. Esto resulta muy útil cuando, por ejemplo, los familiares vivos que se usan como muestras de referencia son los hermanos de las víctimas.

Para terminar este apartado queda señalar que tanto el ADNmt como los polimorfismos del cromosoma Y tienen mucho menos poder de discriminación que el ADN nuclear autosómico utilizado habitualmente. Ninguno de estos tipos de ADN identifica individuos, sino líneas familiares maternas y paternas[11]

2.3.3. Análisis de las muestras de ADN

En un principio la manera de estudiar los marcadores se hizo por medio de la técnica llamada hibridación con sondas o Southern blot.

El tipo de sondas que se utilizan en esta técnica pueden ser de dos tipos:

- Sondas Uni-locus (SLP): La técnica permite detectar loci minisatélites únicos. son específicas para una región de un determinado cromosoma. Se unen a secuencias largas de nucleótidos y presentan mayor variabilidad que las sondas multi-locus. Como resultado se observan una o dos bandas por individuo, según sea homocigoto o heterocigoto. El patrón de bandas obtenido con estas sondas se denomina perfil unilocus de ADN o “DNA profiling”. Se utiliza principalmente en investigaciones de paternidad porque identifica loci minisatélites muy informativos.
- Sondas Multi-locus (MLP): permiten identificar simultáneamente muchas regiones hipervariables. Son sondas de 10 a 15 nucleótidos que se repiten múltiples veces y tras el revelado se observan de 10 a 20 bandas por persona. Este patrón de múltiples bandas es característico de cada individuo, constituye algo así como su “huella dactilar de ADN” y se conoce como huella genética multilocus o “DNA fingerprint”.

Las sondas multi y uni-locus presentan una serie de ventajas e inconvenientes según:

- Información aportada: las sondas multi-locus tienen una mayor capacidad discriminativa al aparecer múltiples bandas. No obstante, las uni-locus son más específicas ya que el fragmento de ADN con el que hibridan es de mayor tamaño. Por consiguiente, para analizar 7 o 8 loci, se deberían utilizar 7 o 8 sondas uni-locus, mientras que con una sola sonda multi-locus podría hibridar de un solo paso esas 7 o 8 regiones hipervariables.
- Cantidad y calidad del ADN: cuando se usan sondas multi-locus se requiere aproximadamente un microgramo de ADN sin degradar mientras que en el caso de las uni-locus se necesita menos de 100 ng y este ADN no necesariamente debe estar en perfecto estado, siempre y cuando el fragmento complementario a la sonda esté intacto.
- Especificidad entre especies: las sondas multi-locus permiten su uso sobre el ADN humano y de cientos de animales superiores, mientras que las uni-locus son exclusivas de ADN humano.

- Aunque las SLP han sido y son bastante útiles en estudios de paternidad no puede decirse lo mismo de su aplicación a la Criminalística ya que presenta una serie de inconvenientes como son:
- La cantidad de ADN que se necesita está entre 20 y 100 ng, cantidad difícil de conseguir en casos de criminalística en los que los indicios biológicos encontrados son mínimos.
- En cuanto a la calidad del ADN, es muy difícil encontrar en buen estado toda la cantidad de ADN que se necesita para un análisis con sondas mono-locus.
- El tiempo requerido para este tipo de análisis es de dos o tres días, debido a la necesidad de tener que utilizar más de una SLP.
- El hecho de que se requieran cantidades elevadas de ADN hace que normalmente, con el primer análisis se consume la totalidad de la muestra, con lo que se dificulta un contraste de pruebas o una posterior revisión del caso.

Todas estas limitaciones se superaron tras la aparición de una técnica muy útil, la reacción en cadena de la polimerasa (PCR: Polymerase Chain Reaction).

2.3.3.1 Extracción o individualización de las muestras biológicas

En una primera fase se aísla la molécula completa, posteriormente se estudian ciertas regiones de ella, concretamente las zonas más polimórficas.

La analítica de ADN se realiza en cuatro fases:

- 1) Extracción de ADN: consiste en separar la molécula de ADN del resto de componentes celulares. La duración de este proceso depende del tipo de resto biológico que se analice, por ejemplo en las muestras de sangre o de saliva el proceso de extracción es más rápido que a partir de un resto óseo o dentario donde el ADN es menos accesible.
- 2) Cuantificación de ADN: se realiza para saber qué cantidad de ADN se ha logrado aislar y en qué estado se encuentra (completo o roto).
- 3) Amplificación de ADN: consiste en copiar muchas veces el fragmento concreto de ADN a estudiar para obtener una cantidad adecuada que nos permita su detección, esto se lleva a cabo por PCR.

- 4) Detección del producto amplificado o tipaje: esta es la fase final del análisis y permite caracterizar y clasificar los fragmentos de ADN estudiados en cada muestra para diferenciar unas de otras.

2.3.3.2 Análisis y tipos de muestras biológicas

Una vez conocidas las técnicas de extracción a continuación se detallan los tipos de muestras que se utilizan para la extracción de ADN y su caracterización biológica.

Sangre: se puede encontrar bien en estado líquido o en forma de mancha. La sangre líquida bien conservada no ofrece ningún tipo de problema, pero es frecuente que al laboratorio llegue sangre putrefacta bien porque se ha estropeado durante el transporte o bien porque pertenece a un cadáver en el cual se ha iniciado la descomposición. Para evitar el primer problema es conveniente realizar una mancha sobre una gasa antes de proceder al transporte de la muestra y para el segundo hay que tratar de buscar otra muestra para el análisis, bien sea un tejido blando, uñas, o un resto óseo, dependiendo del estado de conservación del cuerpo. Por el contrario, la sangre en forma de mancha se conserva más fácilmente y puede analizarse tras varios años si las condiciones de secado fueron adecuadas. Quizás las manchas sobre cueros, maderas tratadas, restos vegetales y tierras sean de las más críticas pues estos materiales tienen diferentes grados de absorción y en ellos se encuentran presentes gran cantidad de inhibidores de la PCR como los taninos, que impiden que la reacción funcione. Para detectar muestras de sangre en la escena de una agresión, se utilizan una serie de métodos como: colorimetría (detección mediante oxidasas), cristalografía, quimioluminiscencia (mediante luminol), inmunocromatografía, etc.

Saliva: estas muestras no suelen presentar problemas en la analítica de ADN. Lo más común es que lleguen al laboratorio en forma de mancha, sobre filtros de cigarrillo, sellos, chicles o prendas o bien en otros soportes como vasos, botellas o huesos de fruta. Se detectan mediante alfa-amilasa.

Esperma: se recoge en los casos de agresiones sexuales. El principal problema es que además de los espermatozoides del agresor se suele encontrar las células del epitelio vaginal de la víctima. Por ello, a la hora de analizar estas muestras aparece una mezcla de perfiles genéticos, pero como el perfil genético de la víctima es conocido se puede determinar cuál es el del agresor.

Pelos: estas muestras requieren un análisis microscópico previo a la analítica molecular con el fin de determinar el tipo de análisis que es posible en ellos (estudios de ADN nuclear o de ADN mitocondrial) además de otras características importantes. Con el análisis microscópico se determinan, entre otros, los siguientes puntos:

- Si se trata de pelos de origen animal o humano.
- Si se trata de pelos completos (con bulbo) o de fragmentos de pelos (sin bulbo). En el caso de fragmentos de pelos los estudios a realizar son los de ADN mitocondrial como se verá en el siguiente apartado. En el caso de los pelos con bulbo se puede determinar en qué fase vital se encuentra éste. En los pelos con bulbo telogénico (en fase de caída) se suele realizar análisis de ADN mitocondrial y en los pelos con raíz anagénica (en fase de crecimiento) se puede realizar un análisis de ADN nuclear.

Tejidos: las muestras suelen estar relacionadas sobre todo con la identificación de cadáveres en los que han comenzado los procesos de putrefacción. Los mejores resultados se obtienen con músculo esquelético tomado de las zonas que estén más preservadas de la putrefacción.

Huesos y dientes: estas muestras se obtienen de los cadáveres ya esqueletizados y son las más problemáticas en cuanto a identificación genética. Los huesos largos (fémur o húmero) y los molares (muelas) son las muestras que ofrecen mejores resultados. La extracción de ADN a partir de este tipo de restos es más larga y costosa que en los casos anteriores.

2.3.3.3 Tipos de muestras dubitadas e indubitadas

Las muestras con las que se trabaja en la identificación biométrica se pueden clasificar en dos tipos:

- Muestras dubitadas o evidencias: son restos biológicos de procedencia desconocida, es decir, no se sabe a quién pertenecen (por ejemplo las muestras recogidas en la escena del delito o de un cadáver sin identificar).

Los tipos de muestras dubitadas más frecuentemente analizadas por técnicas genético moleculares son: sangre (habitualmente en forma de

mancha), semen (lavados vaginales o manchas sobre prendas de la víctima), saliva (colillas de cigarrillo, chicles, sobres y sellos), pelos, uñas, tejidos blandos, restos óseos y dentarios (estos últimos relacionados fundamentalmente con la identificación de cadáveres).

- Muestras indubitadas o de referencia: son restos biológicos de procedencia conocida, es decir, se sabe a quién pertenecen (por ejemplo la sangre tomada de un cadáver identificado, o las muestras tomadas a familiares de un desaparecido). El tipo de muestras indubitadas más habituales son sangre y saliva (frotis bucal).

Para la genética forense, son de interés los denominados indicios biológicos que son los que contiene ADN, y por ello se definen como “toda sustancia líquida o sólida que provenga directamente del cuerpo humano o que haya estado en contacto con el mismo, y en cuya superficie o interior pueda haber restos de células”.

Algunos ejemplos de indicios biológicos obtenidos en la escena del crimen son: sangre, semen, pelos, saliva, tejidos blandos, huesos y dientes, orinas, heces, sudor, etc. En cuanto a los indicios no biológicos, algunos ejemplos son: fibras y tejidos, restos de pólvora y material de disparos, restos de tierra, semillas, plantas y hierbas, tinta pintura, madera, material de engrase, etc.

2.3.3.4 Exclusión e inclusión de resultados

Una vez que se ha estudiado todo lo anterior y se han obtenidos los resultados de ADN de las muestras y se tienen supuestos sospechosos, hay que decidir si el sospechoso es el verdadero autor del crimen o por el contrario se ha inculcado a la persona equivocada. Para ello se definen dos conceptos: Exclusión e inclusión.

Tanto en las muestras tomadas del supuesto criminal como en las muestras recogidas en la escena del crimen se han analizado una serie de loci polimórficos, los mismos en los dos casos:

Si al analizar los loci de ambos, tanto en la muestra problema como en el sospechoso aparecen los mismos alelos, se habla de inclusión, pero esta inclusión nunca es del 100% ya que se está trabajando con probabilidades. Estas probabilidades hacen referencia a las frecuencias de los alelos en la población. Así,

para obtener este valor hay que multiplicar la frecuencia de que los dos alelos del locus 1 se den en la población, por la frecuencia de que los alelos del locus 2 se encuentren en la población, y así sucesivamente hasta multiplicar todas las frecuencias de los loci polimórficos analizados. Este valor será un número muy pequeño, por lo que para dar el resultado final se hace una conversión. Por convenio, está establecido que si tras hacer la conversión se obtiene una probabilidad del 99.73% y todos los alelos de todos los loci coinciden, se estará en lo cierto con una probabilidad altísima si se inculpa al presunto sospechoso como verdadero sospechoso.

Si por el contrario, al analizar los loci de ambos, hay algún alelo en el que la muestra problema y sospechoso no coinciden, aunque sólo sea uno, se habla de exclusión, y en este caso sí es del 100%, es decir, que se tiene certeza absoluta cuando se rechaza al supuesto sospechoso como verdadero autor y por tanto hay que seguir buscando al verdadero sospechoso.

2.3.4. Investigación de la paternidad

Al inicio de este capítulo se citaron las áreas en las que más se utiliza y sobre todo más comercialmente. Una de ellas es en la investigación de la paternidad. Esta área aunque con menos carga criminalística, torna mucha importancia en el momento en el que posibles herencias o legados entran en juego.

En la investigación de la paternidad se parte del presupuesto lógico siguiente: todo el ADN que una persona posee es mitad del padre y mitad de la madre. Para estudiar si alguien es hijo/a biológico de unos padres determinados el procedimiento es sencillo: se selecciona un locus determinado de ADN y se analiza para ver el genotipo del hijo cuestionado. Después se analizan los genotipos del ADN del padre y de la madre.

En esta ocasión también se tienen en cuenta los conceptos de exclusión e inclusión vistos en el apartado anterior.

El análisis de la paternidad se basa en las leyes de la herencia mendeliana. Por tanto si en un hijo se encuentra un alelo que no posee el presunto padre, la paternidad queda excluida con seguridad absoluta. Si por el contrario el hijo tiene un alelo que pueda haber heredado de un presunto padre, hay que realizar cálculos estadísticos

con el objetivo de calcular cuantas personas, entre la población general, podrían ser padres potenciales por tener ese alelo.

Las inclusiones en los supuestos de paternidad tienen que hacerse igual que los casos de criminalística, usando probabilidades estadísticas que deben ser lo más altas posibles. En todo caso, habría que tratar de conseguir siempre una probabilidad de paternidad (escrita como W) superior al 99,9%. O, si se expresa en índice de paternidad (IP), debe ser superior a 1000; esta cifra de 1000 significa que es mil veces más probable que el señor analizado sea el padre a que lo sea otra persona de esa población. La validez de la inclusión depende del número de loci examinados y de la frecuencia con que el perfil de ADN se encuentre en la población general.

Existen dos reglas fundamentales que determinan dos tipos de exclusiones:

- La primera regla de Landsteiner o exclusión directa: establece que todo carácter presente en el hijo que no lo posea la madre, debe forzosamente proceder de su padre biológico. Si el supuesto padre no lo posee, se produce la exclusión de primer orden.
- La segunda regla de Landsteiner o exclusión indirecta: el hijo y el padre son homocigotos para un alelo distinto en un mismo locus. Si esto sucede se produce la exclusión de segundo orden, denominado así porque es menos categórica que la anterior. En este caso se debe tener en cuenta la posibilidad de que existan alelos silentes, mutaciones o alelos presentes pero no identificados.

Estadísticamente el hecho de investigar a la madre es menos frecuente, ya que en el momento del nacimiento la madre queda perfectamente identificada. Sin embargo hay excepciones, como confusiones de recién nacidos en hospitales, el abandono de menores tras partos clandestinos, el secuestro infantil y las desapariciones.

2.3.4.1 La probabilidad de paternidad

La probabilidad de paternidad (W) se calcula mediante la fórmula descrita por Essen-Møller, científico escandinavo que en 1938 desarrolló los aspectos bioestadísticos de las pruebas de paternidad, derivados del teorema de Bayes.

Indica la probabilidad que tiene ese individuo de ser el padre biológico (X), comparado con un hombre al azar de la población (Y). Así, el valor de X depende exclusivamente del resultado de los análisis realizados al trío, y el valor de Y corresponde a la frecuencia en la población del alelo del hijo que obligatoriamente ha recibido del padre. Generalmente se asume que la madre y el presunto padre no están relacionados.

El índice de paternidad indica cuantas veces es mayor la probabilidad del presunto padre de ser el padre biológico del hijo con respecto a un hombre tomado al azar.

A la hora de investigar la paternidad, si el supuesto padre ha fallecido y se hace una reclamación de filiación, se presentan diversas estrategias de análisis para responder a la pregunta de filiación:

- Proceder a la exhumación del cadáver.
- Recurrir a familiares vivos del supuesto padre, para intentar deducir su patrimonio genético.
- Utilizar muestras biológicas del individuo fallecido, que hayan sido obtenidas antes de su muerte.

2.3.5. Identificación de restos cadavéricos

Al igual que ocurre con la paternidad, la identificación de cadáveres es un importante ámbito y por ello a continuación se describen los procesos involucrados y sus características. La identificación de los restos cadavéricos procedentes de los accidentes de tráfico, grandes catástrofes, personas desaparecidas, etc., constituye un tipo de análisis muy solicitado en genética forense.

Cuando se produce la aparición de un cadáver o restos cadavéricos cuya identidad se sospecha pero no se pueda establecer con total seguridad por métodos tradicionales (antropológicos, odontológicos, etc.), se puede recurrir a un estudio genético como complemento ó como única vía posible de identificación.

Los cadáveres de los que no haya sospechas sobre quién se trata deben ser igualmente analizados y sus perfiles genéticos deben ser almacenados en una base

de datos anónima que permita su comparación con muestras de referencia de personas que tengan familiares desaparecidos.

La gran variedad de situaciones que pueden darse, aconsejan una clasificación de los casos que pueden ser resueltos primero en función del tipo de muestra que se debe analizar y segundo en función del tipo de caso.

Atendiendo al estado de conservación de la muestra, los casos más típicos son:

- Restos cadavéricos en buen estado de conservación. la recogida de muestras se realiza inmediatamente después de la muerte, las muestras más adecuadas son sangre y/o músculo. En los casos en los que se producen víctimas carbonizadas, el ADN es muy estable a las altas temperaturas a las que se ve sometido y en general es posible obtener ADN de alta calidad.
- Restos cadavéricos con un avanzado estado de putrefacción o esqueletizados. Se trata de restos en los que la toma de muestras se realiza después de un periodo de tiempo largo tras la muerte, en este caso las muestras más adecuadas son piezas dentales o huesos largos. Son los casos que entrañan mayor dificultad en cuanto a la obtención y el análisis del ADN.
- Restos cadavéricos embalsamados. Normalmente son los casos que entrañan la mayor dificultad puesto que lo más común es que la conservación del cadáver se realice mediante formol o derivados y está demostrado que el formol produce grandes modificaciones de los ácidos nucleicos.
- Restos cadavéricos momificados. En ciertos cadáveres se producen fenómenos naturales de momificación como consecuencia de la rápida evaporación del agua del cuerpo, con lo que se detiene el desarrollo de microorganismos y por tanto la putrefacción y por tanto el material genético de los tejidos blandos momificados se preserva en condiciones que permiten su análisis, que en condiciones habituales no sería posible debido a los procesos destructivos del cadáver.

2.3.6. Bases de datos

Muchos de las identificaciones que quedan sin completar porque en un momento determinado no hay un sospechoso, pueden ser resueltas, incluso años después de que se hayan cometido, gracias al desarrollo de las bases de datos. Éstas pretenden colaborar en la resolución de casos criminales permitiendo la comparación automatizada de perfiles de ADN procedentes de diversas fuentes: indicios no identificados de la escena del crimen, muestras de referencia de sospechosos y muestras de referencia de víctimas. Tras las comparaciones pertinentes, y con un número suficiente de muestras analizadas, se puede comprobar si una persona (imputado o procesado) ha dejado indicios biológicos en más de una escena criminal o sobre más de una víctima. Éste es uno de los medios más eficaces de controlar a los criminales en serie y a delincuentes reincidentes, algo muy típico en casos de violaciones.

Así, se puede encontrar que una serie de violaciones han sido cometidas por la misma persona, porque el ADN del esperma coincide en todos los casos, pese que aún no se haya podido detener a ningún responsable.

En la práctica y para su uso, las bases de datos de identificación genética permiten la comparación automatizada a gran velocidad de los llamados “perfiles de ADN”. Estos no son más que los números y letras que identifican los fragmentos de ADN, y cuya cadena exacta es única para cada persona y presenta ciertas características comunes en el caso de parientes. Existen diferentes bases de datos y entre todas ellas la de mayor capacidad de aplicación para el área América Latina es el sistema CODIS (Combined DNA Index System), desarrollado en los EE.UU. por el FBI.

En el momento actual existen múltiples problemas de tipo técnico, científico, económico y social para llevar a cabo un proyecto de banco genético general para toda la población, por lo que no se plantea su elaboración. Sí se están realizando sin problemas en determinadas profesiones de riesgo en las que los profesionales de forma voluntaria y con consentimiento explícito donan una muestra de saliva o sangre para ser analizada en caso de accidente, con vistas a solucionar todas las cuestiones civiles que pueden presentarse ante la falta de identificación del cadáver o de sus restos. En todos los casos se aprecia un beneficio en la realización de este tipo de bancos, desde el punto de vista social se ha planteado la conveniencia de proceder al

archivo de estas muestras en determinados individuos con vistas a evitar un daño a la sociedad, concretamente la discusión se ha centrado en los casos criminales, hablando de la necesidad de proceder al archivo de todos los criminales autores de delitos graves, limitándolas en principio al homicidio y a las agresiones sexuales. Las decisiones han variado según los países, y en la actualidad los dos únicos que tienen una base de datos genética de utilización rutinaria en los casos prácticos son Estados Unidos y Gran Bretaña. El primero de ellos sólo archiva el perfil de los criminales que han sido juzgados y condenados por agresiones sexuales, decidiendo instaurar este tipo de archivo debido fundamentalmente a la existencia de los denominados "violadores en serie" tendentes a repetir el mismo tipo de conductas y a las limitaciones para combatirlos, sobre todo por la movilidad y la diferente jurisdicción entre los distintos estados. En el Reino Unido se ha ido más allá y se procede al archivo de muestras biológicas de todas aquellas personas que se han visto envueltas en un hecho delictivo. En España no es posible llevar a cabo un proyecto de este tipo debido a la falta de un marco legal apropiado para su realización, especialmente por las posibles consecuencias negativas que del mal uso de los mismos se pudiera hacer.





3

FIRMA ESCRITA



3.1. Introducción

Para comenzar a entender las bases de este método de identificación conviene recurrir a las definiciones que sobre “firma” y “rubrica” nos proporciona la RAE: “Nombre, apellido, o título, que una persona escribe de su propia mano en un documento, para darle autenticidad o para expresar que aprueba su contenido”; “Rasgo o conjunto de rasgos de forma determinada, que como parte de la firma pone cada cual después de su nombre o título, y que a veces va sola, esto es, no precedida del nombre o título de la persona que rubrica”

De estas definiciones podemos extraer que es un rasgo diferencial a cada persona, que aporta autenticidad a un hecho o documento sobre una base escrita. Esto último es importante ya que la escritura es un sistema de representación gráfica de una lengua, por medio de signos grabados o dibujados sobre un soporte.[12]

Antes de continuar con las bases caligráficas y la evolución de ésta a lo largo de la historia, remarcando su importancia capital en el mundo de la política, banca, finanzas o policial, lo más conveniente es diferenciar entre tres términos que se entrelazan y confunden, no siendo lo mismo y pudiendo llevar a equívocos.

El primer término es el de firma electrónica escrita, considerando esta denominación la más correcta para la técnica que se estudia en este trabajo, y específicamente en este apartado.

El segundo término corresponde al de “firma biométrica”, puede dar lugar a error, ya que una huella dactilar o el iris también pueden ser tipos de firma biométrica. Para evitarlo se puede utilizar el término “firma biométrica manuscrita”. Por último, conviene señalar que esta acepción puede inducir a muchos errores cuando estamos hablando de sistemas y canales totalmente distintos. “Firma digitalizada”, es un término bastante utilizado en España. Puede confundir al usuario, al creer que la seguridad de este sistema equivale simplemente a la digitalización de la firma a través de un escáner. Pero nada más lejos de la realidad. Cuando hablamos de firma digital nos referimos al procedimiento por el cual se puede asociar o identificar a una persona o un equipo informático durante la transmisión de mensajes de carácter telemático o en la gestión y tramitación de documentos electrónicos.

Brevemente y Para no reincidir en esta explicación, se puede decir que todo este proceso se lleva a cabo a través de métodos criptográficos y además, según el método empleado, se puede incluso llegar a asegurar la integridad del documento o el mensaje.

La firma digital permite que tanto el receptor como el emisor de un contenido puedan identificarse mutuamente, con la certeza de que son ellos los que están interactuando, evita que terceras personas intercepten esos contenidos y que los mismos puedan ser alterados, así como que alguna de las partes pueda "repudiar" la información que recibió de la otra y que inicialmente fue aceptada.[13]

En España estos métodos están regulados por la Ley 59/2003 del 19 de Diciembre (BOE-A-2003-23399) que define tres tipos de firma:

- Simple: Sólo se requieren los datos para autenticar al usuario.
- Avanzado: Además de autenticar al usuario, en este nivel, se comprueba la integridad del mensaje o documento.
- Reconocida: Es la firma avanzada y amparada por un certificado reconocido, éste se otorga tras verificar presencialmente la identidad del firmante.

Una vez realizadas estas aclaraciones, importantes para entender el ámbito de actuación del proceso que se estudia en este capítulo y no de otros muy parecidos en nomenclatura pero distintos en el resto de características, se procede a estudiar la ciencia sobre la que se fundamenta esta técnica de identificación: la caligrafía.

3.2. Historia de la Caligrafía

La caligrafía es la base de la identificación que se estudia en este apartado, ha sido una de las artes más influyentes e importantes a lo largo de la historia, a través de la cual, diferentes culturas han transmitido sus legados y conocimientos. A diferencia de la comunicación oral, la escrita es permanente e inalterable en el tiempo, no sufriendo modificaciones y pudiendo transmitir con exactitud textos y soluciones científicas que en el boca a boca se degradarían y perderían exactitud. Por ello, repasaremos cronológicamente los más destacados hitos caligráficos a través de la historia de la humanidad:

3000 años a.C. La escritura logográfica china se encuentra entre los sistemas de escritura más antiguos del mundo, y su origen aún sin desvelar, sigue siendo objeto de discusión y estudio. El chino es una lengua tonal y monosilábica que se escribe con ayuda de grafías denominadas “caracteres”, cada uno de los cuales corresponde a un sentido determinado y a una sílaba que sustenta un tono.[14]

2000 años a.C. La mitología griega clásica atribuye la invención de la escritura al rey Cadmos, y, según ésta, el soberano, también se la habría enseñado a los fenicios. En la época clásica, los usos de la escritura se multiplicaron, adquiriendo una importante dimensión política en las ciudades.

El alfabeto griego dio origen a un gran número de escrituras, tanto en Oriente como en Occidente, entre ellas el etrusco, origen del latín.

800 años a.C. Alrededor del siglo VIII a. C., la civilización etrusca se desarrolló en una amplia zona de Etruria, que hoy corresponde a Italia central. Tomaron el alfabeto de los griegos. Como el aprendizaje del sistema alfabético no requería una especial dificultad, no necesitaban escribas, por lo que la escritura indicaba la pertenencia a la nobleza, elite social y cultural.

700 años a.C. De los alfabetos que más trascendencia han tenido destaca la romana imperial incisa. Su origen, debe remontarse al siglo VII a.C. en el Lacio, región del centro-oeste de Italia, ocupada en ese momento por los etruscos. La capitalis monumentalis o mayúscula monumental, ha ejercido una influencia fundamental en la historia de la escritura. Se mantuvo en activo durante la alta Edad Media hasta finales del periodo carolingio, fue actualizada por los humanistas, y hoy todavía se emplea, conocida como mayúscula cuadrada o de imprenta, para titulares y títulos de capítulos, así como para los “incipit” de los libros.

Inicialmente se empleaba por los escribas y se reservaba para usos rituales, honrar el culto de los dioses y del emperador. Posteriormente pasó a formar parte de la vida cotidiana de los romanos: cualquier obra arquitectónica se llenaba de inscripciones y hasta el más mínimo ladrillo se sellaba y se fechaba. Han llegado hasta día de hoy todo tipo de inscripciones, sobre todo las reservadas al culto funerario, aunque muchas actas privadas solían transcribirse sobre soportes perecederos (tablillas de arcilla o de cera), por lo que la mayor parte de ellas se han perdido. La

obra más importante de esa época es la columna de Trajano en Roma, llena de inscripciones lapidarias.

Siglo I. La escritura alfabética lineal procede directamente de los jeroglíficos egipcios. Esta escritura es derivada de la técnica jeroglífica de la época faraónica. La importancia de la escritura jeroglífica era tal, que si algún profesional podía considerarse privilegiado en la civilización egipcia, éste era el escriba. Tan importante era, que al principio, estaba solo reservado a los miembros de la familia real. La escritura jeroglífica se pudo descifrar gracias al descubrimiento de la piedra de Roseta, que presentaba un decreto grabado en tres versiones : en escritura demótica, en caracteres jeroglíficos y en griego.

Posteriormente fueron los fenicios y su comercio por todo el Mediterráneo los que divulgaron su escritura y su lengua. Muy próxima a la escritura fenicia, pero en oriente, se creó la aramea, que posteriormente fue el origen de la escritura hebrea, que tuvo una gran importancia cuando tras una cruenta guerra contra los romanos (132-135) y la decadencia del país, condujo a la diáspora por todo el mundo conocido (norte de África y toda Europa), pero conservando sus leyes y su escritura.

Desde el siglo I, los chinos profesan un auténtico culto a la caligrafía, que consideran como una de las bellas artes. La escritura alfabética china, muy compleja a los ojos de quienes están habituados a las escrituras alfabéticas, ejerce una extraña fascinación entre los que se inician en los estudios lingüísticos. Sin embargo. Por compleja que sea, la escritura china tiene su razón de ser y los chinos defienden ferozmente su integridad, que es la garante de su identidad nacional y de sus raíces.

El sistema de escritura japonés está inspirado en la escritura china, de la que ha recibido sus principales componentes gráficos. Para ello fue necesaria una adaptación a la lengua del archipiélago, lo que explica la naturaleza compuesta de la escritura japonesa actual, a la vez ideográfica y fonética.

Para ratificar esta fascinación por la escritura un dato clarificador es que la invención de la imprenta tuvo lugar en China, mucho antes de que Gutenberg se interesara en el asunto. En el siglo II, en el gran imperio asiático ya se había desarrollado el arte de imprimir textos, procedimiento que allí no resultaba una novedad, pues se utilizaba para imprimir imágenes y dibujos sobre tela desde hacía por lo menos cuatro siglos. La técnica, llamada xilografía, consistía en crear una

imagen negativa en un bloque de madera, entintarla e imprimirla en el soporte deseado. Hacia el año 1041, un inventor chino puso a punto los primeros tipos de imprenta móviles, de barro cocido.

En el norte de Europa (Escandinavia y Dinamarca) en el siglo II, apareció la escritura rúnica. Con las invasiones vikingas se extendió por buena parte de Europa. Las runas representan divinidades, plantas sagradas, rituales,... por lo que se les atribuyen poderes mágicos.

Siglo IV. La escritura árabe surgió en el siglo VI, descendiente del alfabeto arameo, que en esa época se utilizaba en Oriente Próximo. Hoy en día es utilizado en todos los estados árabes, excepto Turquía y en gran número de países musulmanes no árabes. Es tan importante que, en la actualidad, su aprendizaje forma parte de la educación religiosa de los jóvenes musulmanes en las madrasas.

Desde la muerte de Mahoma, en poco más de cien años, los árabes crearon un Imperio que se extendía desde la península Ibérica hasta la India.

La prohibición islámica de representar imágenes de todo tipo favoreció la presencia de la caligrafía en el arte musulmán, adquiriendo un progresivo protagonismo en la decoración. A esto hay que añadir que hasta principios del siglo XIX no se introdujo en el mundo musulmán el uso de la imprenta.

En cuanto a la escritura romana, convendría distinguir la antigua y la reciente. Ésta apareció a finales del siglo III, con una importancia fundamental, ya que se trata del primer alfabeto de la historia que presenta todas las minúsculas.

La minúscula romana se difundió por todo el Imperio y dio origen a multitud de variantes locales (visigótica, merovingia, curial, lombarda, semiuncial, etc.) que se desarrollaron desde el siglo V al IX, cuando fueron sustituidas por la carolingia.

Siglo V. El cristianismo pasó a ser la religión oficial en los años previos a la caída del Imperio Romano en el siglo V y la uncial fue la primera escritura monástica y al servicio casi exclusivo de la Iglesia, a los “scriptoria” de los monasterios, lo que en el fondo provocó su desaparición.

Desde que el cristianismo se convirtió en la religión oficial del Imperio Romano (s. IV, Constantino el Grande), el latín se impuso como lengua religiosa y con la caída

del Imperio, las invasiones bárbaras y la desmembración en numerosos reinos, la Iglesia fue el único eje unificador y la escritura uncial se convirtió en la monástica por excelencia, diferenciándose los textos sagrados de los páganos, escritos en rústica. Con el tiempo, cada región tendió a desarrollar su propia variante local. Posteriormente apareció la carolingia.[15]

Siglo VII. En el siglo IV, tribus godas llegadas al mar Negro desde la lejana Suecia penetraron en Capadocia donde hicieron como prisionero a Ulfilas o Wilfilas, obispo arriano, erudito que inventó un alfabeto para dar forma escrita a la lengua que aquel pueblo hablaba, con la intención de poder traducir la Biblia.

En el siglo XII, Europa se ve sometida a grandes cambios: la consolidación de la burguesía urbana hace crecer su importancia económica y su poder político, que tiene su plasmación en la edificación de las grandes catedrales, símbolos de la época. En el mundo de la caligrafía los scriptoria y las universidades abandonan la minúscula carolina (litera antiqua) para adoptar la letra gótica (litera moderna), aunque gráficamente muy distinta de la creada por Ulfilas.

A lo largo de varias generaciones la minúscula carolina (letras independientes, redondeadas y bien definidas, pero lentas de elaborar) fue convirtiéndose en una escritura llena de puntas, ángulos y rasgos verticales, más rápida de escribir y que podía comprimirse a voluntad (ahorro de trabajo y materiales), que se llamó o bien carolina tardía o gótica temprana.

Siglo VIII. Carlomagno fue el primer gobernante de la historia europea que comprendió que el poder político se asienta en la capacidad de comunicación. Reinaba desde Danubio al Ebro y de Francia a Italia del Norte; un mosaico de pueblos surgidos tras la caída del Imperio Romano: lombardos, alamanos, anglos, sajones, jutos, burgundios, vándalos,... Y cada uno con su propia letra. Para que todos pudieran comprender sus órdenes, Carlomagno creó una escritura unificada que extendió por todo su Imperio.

La escritura carolina fue creada por Alcuino de York y su turba scriptorum. Todas o casi todas las minúsculas influyeron en la carolingia, aunque ésta, más clara y legible, sustituyó a todas en el momento de su creación.

En Hispania, tras la flagrante derrota que los ejércitos de Carlomagno habían padecido en Roncesvalles en 785, éste renunció a la conquista de territorios peninsulares, salvo una región comprendida entre los Pirineos y el río Llobregat, que se conoce con el nombre de Marca Hispánica, que en principio estaba deshabitada. En esta zona, la minúscula carolingia se implantó doscientos años antes que en el resto de la Península, donde la visigótica pervivió en los documentos de los reinos de Asturias, Castilla y León, surgidos de la Reconquista.

Siglo XI. Desde Bagdad a Granada, los árabes maravillaban al mundo con el colorido de sus azulejos y de sus encajes y la variedad de sus escritos murales repitiendo el nombre de Alá en sus mezquitas. El Corán enseña que el arte de escribir es un don que Dios ha otorgado a los humanos, y el oficio de calígrafo era ya respetadísimo en las sociedades musulmanas de los siglos XI y XII. Aunque el Corán no permite la representación de la figura humana, los libros islámicos de temas no religiosos son muy ricos en ilustraciones, compitiendo e incluso superando a los occidentales. Sin embargo la mayor aportación de los eruditos árabes a la cultura occidental fue, sin duda alguna, los números y, muy especialmente, la introducción de un concepto tan fundamental como el “0”, indispensable para el desarrollo de las matemáticas.

Siglo XII. En Occidente, hasta finales del siglo XII, la escritura estuvo monopolizada por los monjes copistas; pero con el auge de las ciudades y de las universidades se hizo imprescindible la instauración de un nuevo sistema de producción de libros basado tanto en una organización más eficiente del trabajo como en la creación de los oficios del libro. Los artesanos laicos y remunerados no tardaron en incorporarse a aquellas tareas, sobre todo aquellos poseedores del genio necesario para iluminar o esbozar una escena relacionada con la Biblia o con la vida monástica. Además se asistió a la creación y al auge de la figura del librero, personaje central a cuyo alrededor giraban copistas, miniaturistas y encuadernadores. Se pasó de los misales y los salterios a los manuales de caza, estudios sobre prácticas agrícolas y libros de poemas, de relatos cortesianos o de caballerías. Los libros se caligrafiaban en Florencia, se ilustraban en Roma y se ponían a la venta en la librería real de Nápoles, partiendo hacia los libreros de Oxford o de París o a las diferentes universidades. En la Alemania de 1547, un investigador llamado Gutenberg construía una máquina que habría de cambiar el curso de la historia y capaz de imprimir cien hojas exactamente

iguales y empleaba en dicho proceso el mismo tiempo que habrían necesitado cincuenta artesanos de la pluma y con un resultado mucho más perfecto.

Siglo XIII. En los siglos XIII y XIV, que marcan el paso de la Edad Media al Renacimiento, la caligrafía gótica cayó en desuso ante la clara y luminosa humanística, nacida en Italia de un deseo de los copistas de recuperar la sencillez y la armonía de la carolina (a la que llamaban "litera antiqua") y para satisfacción de los lectores por la dificultad que entrañaba la lectura de la gótica cursiva (Petrarca la consideraba propia de pintores y afirmaba que había sido inventada para cualquier cosa menos para leer). Así fue como comenzó a utilizarse la letra redonda humanística, que conservaba las cualidades armoniosas de sus rasgos limpios independientemente del tamaño, desde la más diminuta a la más gigantesca. Su mayor esplendor coincidió con la aparición de la imprenta, pues la cursiva humanística fue la más utilizada, desde un principio, para los caracteres tipográficos.

Siglo XV. A mediados de este siglo fue creada una nueva escritura, la cancillerescas, inicialmente reservada para uso exclusivo de la chancillería pontificia para la confección de documentos importantes. De ejecución sencilla pero de refinada elegancia, pronto se extendió y se utilizó con distintas variantes, cada vez más complicadas e ilegibles, hasta que finalmente fue suprimida en 1878 por el papa León XIII. En los principios de la Edad Media, la Iglesia detentaba el monopolio de la escritura. La lectura se hacía en voz alta, de manera muy lenta, pues los textos se copiaban de continuo, sin separación entre las palabras ni signos de puntuación. Pero a partir del siglo XI, la presentación comenzó a evolucionar: los monjes separaban las palabras, dividían el cuerpo del texto en párrafos e introducían incipientes signos de puntuación, a fin de aumentar la legibilidad y la velocidad de lectura de los textos sagrados.

A partir del momento en que la Iglesia tomó en sus manos el control de lo que las gentes debían pensar y saber (más o menos hacia el siglo IV), la cultura y el saber se encerraron entre las paredes de los monasterios y la fe fue el núcleo de todo conocimiento. Así ocurrió durante toda la Edad Media. Pero a partir del siglo XII, con la extensión de la lectura y la escritura al mundo laico, las puertas de los monasterios se abrieron y el conocimiento y la cultura se extendieron más allá de sus muros, produciéndose el tránsito hacia el humanismo renacentista.

Durante siglos, el latín permaneció como la lengua oficial de los textos y del saber, pero a partir del siglo IX, la cultura se decantó hacia el laicismo y las lenguas vernáculas comenzaron a imponerse.

Alrededor de 1450, Gutenberg, orfebre alemán, puso a punto los primeros caracteres móviles de plomo. Este procedimiento descansaba en dos técnicas de invención anterior: la prensa y el papel. Progresivamente se fue afianzando el uso de la imprenta. Las primeras letras imitaban a la escritura de los libros manuscritos y las capitulares eran ornamentadas a mano por el miniaturista, con lo que el resultado final no tenía nada que envidiar y era y es difícil de distinguir de las obras manuscritas.

La obra más famosa de Gutenberg es la Biblia, llamada de “42 líneas” (número de líneas por página), con más de 270 tipos móviles distintos realizados a la manera de la escritura gótica y realizada con excepcional perfección técnica, lo que demuestra que fue resultado de varios años de ensayos e investigaciones. Fue publicada hacia 1455. Se imprimieron 160 ejemplares, de los cuales se conservan 49.

En la época de la aparición de la imprenta, la escritura gótica era la más extendida por Europa, por lo que fue la que inspiró los primeros caracteres tipográficos. A finales del siglo XV, se buscó una mayor legibilidad mediante la implantación de la letra romana. Las de caja baja (minúsculas) se parecen mucho a la minúscula carolingia, mientras que las mayúsculas o cajas altas recuerdan las que se emplearon en las inscripciones lapidarias descubiertas en los monumentos de la antigua Roma.

3.3. Técnicas analógicas de procesado de la firma.

Antes de la existencia de muchos de los avances científicos y tecnológicos ya se utilizaban medidas de identificación biométrica como se ha visto en apartados anteriores. Uno de los más extendidos, por no decir el más, era sin duda el análisis caligráfico de la firma o de otros textos significativos y con carácter vinculante, en este apartado se desgranarán los pormenores de esta técnica “analógica” por no hablar de “no-digital”.

En general, la escritura está definida como la representación gráfica del pensamiento, concepto amplio, que abarca las mecanografías y hasta la pintura.

Como principio fundamental, se precisa que el grafismo es individual e inconfundible, por lo tanto se puede traducir que cada persona posee una escritura que jamás se puede confundir con la otra. No existen dos grafismos iguales, pudiendo siempre ser distinguido del otro.[16]

Si la escritura pertenece a una persona, se corresponde con esa persona y no con otra, es decir se “personaliza”. Así, como no hay dos impresiones digitales iguales, no existen dos escrituras iguales, pero la identificación de una persona por su letra va más allá: nadie puede escribir dos veces exactamente de la misma manera y por lo tanto, aparecen variantes o alternativas personales. Muchas veces se ha dicho que si hay dos firmas exactamente iguales debe aceptarse que una es falsificada (calco). La explicación del hecho es perfectamente lógica si se tiene en cuenta que el acto escritural es la combinación de un conjunto de factores tan complejo y extenso, que según las leyes de casualidad no puede producirse más de una vez.

Los atributos componentes de la personalidad humana se transforman, por ende se comprende que naturalmente la escritura sea pasible de mutación; ya que ésta es una de las formas de exteriorización de esa personalidad. Pero algunas características se resisten a esas transformaciones y, en consecuencia, siempre se podría reconocer la individualidad a través del cotejo de facsímiles oriundos de mismo individuo, producidos en cualquier época de su vida y en cualquier condición (para este caso sería indispensable obtener patrones producidos en todas las épocas, o en las condiciones anormales en que se hubiese desempeñado el escritor).

La firma es la representación gráfica de la persona en el ambiente social en que actúa. Es extraordinario como un pequeño conjunto de caracteres adquiere significación. Su lanzamiento en cualquier soporte acarrea para el individuo las mayores responsabilidades. Como solo la firma tiene una marcada importancia social, y no puede aún ser sustituida por otra señal individual, corresponde resguardarla cuanto sea posible de la acción del falsificador. Para la acción eficiente en ese sentido será indispensable conocer la técnica del falsificador, sabiendo cómo actúa y cuáles son los puntos en que tropieza con mayores dificultades.

3.3.1. Método de estudio analógico

En general, lo que el perito calígrafo hace en primer lugar es estudiar en forma total y exhaustiva los elementos auténticos o indubitados; busca con ello

compenetrarse y conocer cabalmente la modalidad personal de la escritura con la que deberá comparar la cuestionada. En segundo lugar, procede a examinar minuciosamente los grafismos cuestionados, tratando también de captar todo aquello que le indique cuál es o cómo es la personalidad gráfica del autor del texto o la firma dubitada. Por último, conocidas ya las peculiaridades de ambos extremos ofrecidos, procederá al cotejo técnico entre ambos.

Evidentemente, lo dicho se aplica al caso simple o teórico de un peritaje caligráfico normal. Pero, por supuesto, cada caso es único, y entonces el método puede admitir, aun manteniéndose dentro de esos cánones generales, todas las variedades que el caso y el perito aconsejen. Nada obsta a que primero se examine la escritura dudosa y luego la indubitable, o que primero se analice el papel o soporte en sus condiciones físicas, o que se someta el documento a la luz ultravioleta para desechar la existencia de lavados químicos, o a la transparencia para ver si ha existido o no un borrado mecánico, etc. Además, deben considerarse las variantes metodológicas a que puede obligar el uso de instrumental de medición, de aumento óptico, de fotografía, de cromatografía, etcétera, o también las circunstancias derivadas de la intervención de uno o de más peritos de forma conjunta. Lo expuesto significa, entonces, que si bien existe un método generalmente aceptado y aplicado por la técnica grafo-pericial, el experto dispone de un amplio campo de acción para introducir las variaciones que a su criterio convengan.[17]

La opinión del perito calígrafo, basada en la comparación, el criterio equitativo y la experiencia, puede ser positiva, calificada, negativa o de no conclusión. El examen de documentos puede ser una importante herramienta investigativa y debería ser empleada para eliminar o descubrir sospechosos. Con este concepto en la mente, la importancia de obtener adecuados y suficientes ejemplares indubitados de confrontación está directamente relacionada con la validez del dictamen del experto.

El perito calígrafo no puede reconocer una escritura sin antes haberla conocido. Y para conocer una escritura determinada debe estudiarla, captarla, analizarla, y sólo después, aplicando su ciencia y su método, podrá concluir.

La primera preocupación de quien necesita un Dictamen Pericial Caligráfico es la de proveer al perito de la mayor cantidad posible de elementos auténticos de la

persona cuya caligrafía debe estudiar para que pueda saber, sin haberla visto escribir, si lo hace velozmente o no, si apoya el elemento escritor de tal o cual forma, etcétera.

El perito tendrá en cuenta los hábitos de movimiento escritor y las causas de los impulsos, es decir, la formación de los trazos, la sucesión de movimientos, la morfología gráfica, los sistemas gráficos, las diferentes formas y estructuras, la conformación de las gramas escriturales, la línea base de escritura, los polimorfismos gráficos, etc. También se debe tener en cuenta cómo es la escritura en todo lo concerniente a la composición de la misma como por ejemplo: la inclinación de los ejes que la componen, separaciones intergramaticales e interlineales, las relaciones de altura entre cúspides, etc.

De igual modo, el perito debe estudiar las limitantes verbales o gramaticales, la celeridad, el ritmo de la escritura, la preponderancia de curvas sobre los ángulos, la presión más o más o menos notoria ejercida por medio del implemento escritor sobre el soporte o papel.

Aisladamente ninguna de estas características escriturales dará una conclusión, y es teniendo en cuenta el conjunto de estos caracteres gráficos a fin de determinar si no nos encontramos ante un escrito y/o firma auténtica o falsa.

La eficiencia del perito está directamente ligada a su experiencia profesional, a su sentido analítico, a su perspicacia y a su laboratorio, que es el cerebro del perito. Los aparatos sirven para reforzar la visión física, cosa completamente diferente de la visión pericial.

Es un hecho de que la pericia caligráfica moderna se basa en el análisis técnico-científico de elementos humanos concretos, personales y constantes; ese estudio necesita de elementos suficientes e idóneos para que pueda producirse la captación y el conocimiento, por el perito, de una “personalidad gráfica” individual.

El perito calígrafo no opera con cálculos matemáticos; lo que puede ser significativo para una escritura puede no serlo para otra, cada conjunto dubi-indubitado debe ser examinado individualmente y la cantidad de concordancias necesarias para arribar a una identificación puede variar enormemente de un caso a otro.[18]

Pero hay que reconocer que, si no existen aquellas bases, el perito no podrá incursionar en el terreno de las adivinanzas o de las inducciones, pues habrá subjetivado un análisis que debe ser objetivo.

3.3.2. Patrón gráfico de confrontación

Los patrones gráficos de cotejo deberán satisfacer cuatro requisitos: autenticidad, adecuación, contemporaneidad y cantidad.

Para proceder a la identificación del autor de una determinada escritura manuscrita o firma es necesario contar con abundante material indúbido efectuado por la o las personas sobre quienes recaigan las sospechas de autoría. Los elementos de pericia –dubitados e indubitados- deben ser originales.

Los elementos indúbitos deben ser del mismo tipo que los inculpatos: firmas, iniciales, letra cursiva, letra tipo imprenta, números, mayúsculas y minúsculas, etc.

Las identificaciones de manuscritos y/o firmas sobre fotocopias, duplicados carbónicos, fotografías o cualquier tipo de documento obtenido por duplicación, sin importar el método empleado se realizan, pero sus conclusiones tienen reservas acorde al tipo de reproducción.

“Para la no identidad puede ser suficiente que un solo signo se imponga razonablemente a no ser reconocido como verdadero (...) En la práctica, para establecer la no identidad entre dos escritos es indispensable hallar diferencias substanciales y dinámicas, a pesar de la presencia de eventuales semejanzas formales; es suficiente una sola diferencia cualitativa e inexplicable para albergar la hipótesis de la no identidad de la mano inscriptora” (Moretti).

“Una escritura bien imitada no será nunca igual a la verdadera, porque la escritura imitada no podrá ser espontánea (...) Una escritura imitada no puede ser espontánea por cuanto el falsificador debe vencer dos fuerzas contrarias: abstenerse de los propios hábitos (el hábito es predominante y es casi imposible abstenerse de él) y, además, asumir y aplicar los hábitos de otros.” (Davide Vismara, 1883).

3.3.3. Documentos firmados en blanco

Las posibilidades documentoscópicas de verificar si determinado contexto habría sido asentado antes o después de la firma o firmas que se ven en él, es una pericia relativamente difícil. En algunos casos, aun cuando el texto haya sido producido con posterioridad a la firma, el perito no dispondrá de elementos que permitan la afirmativa en ese sentido. Pero en un gran número de ellos, la pericia consigue señalar indicios expresivos y algunas veces hechos denunciadores de una anormal confección del documento.

La existencia de firmas en hojas en blanco es bastante más frecuente de lo que se puede imaginar. Generalmente son personas que se ausentan y que dejan en poder de familiares o de abogados, hojas de papel en blanco que sólo contienen su firma. Para ir finalizando, un texto debería ser inserto en el papel, colocándose antes de la firma.[18]

En este sentido material no existe falsedad. La firma es también auténtica. Ninguna objeción se puede levantar en cuanto a la confección del texto, toda vez que en la generalidad de los casos éste puede ser producido por cualquiera, sea en forma manuscrita o no.

Pero se producen abusos en la utilización de esos papeles apenas firmados. En lugar de usarlos de acuerdo con lo combinado, el depositario, traicionando la confianza del amigo o poderante, redacta otros textos a través de los cuales perjudica al signatario, obteniendo deudas o transformándose en acreedor fantástico. En otras ocasiones, esas hojas caen en manos de terceros.

Por lo expuesto se puede afirmar que el simple hecho de que el texto haya sido escrito después de la firma o firmas, no lo torna de por sí en un documento fraudulento. Si el texto fuera declarado de acuerdo con lo combinado, el documento es válido, aun cuando no haya sido normalmente elaborado. Sí, no sólo no repitiera lo combinado sino que también fuera visado para fines diversos, creando obligaciones para el firmante, se caracterizará el fraude. Desde el punto de vista físico (en su parte material) el documento es auténtico, teniendo como anomalía sólo la circunstancia de que el texto haya sido escrito posteriormente a las firmas. La falsedad está en aquello inserto indebidamente en el texto (falsedades ideológicas).

Las pruebas e indicios más comunes son obtenidos: por el análisis de los cruzamientos; por la distribución de los textos y de las firmas; por los evitamientos; por la demostración de ante o posdatación; por el entrecruzamiento de los escritos con agujeros, manchas, dobleces, etc.; por la prolongación de surcos de otros documentos; por cortes manuales de los soportes; por la ausencia de copias carbónicas (cuando su impresión consta en el texto); por la ausencia de prolongación de carbón, etcétera.

No hay límites para las pruebas e indicios que pueden ser recolectados en estas demostraciones.

3.3.4. Principios básicos de la pericia caligráfica

Son variados los parámetros que se consideran al establecer una conclusión respecto de las características del autor de un escrito. Todos ellos tienen su fundamentación teórica y punto de partida en las Leyes Universales de la Escritura establecidas por el Dr. Edmond Sollange Pellat que, a su vez, se basan en un Principio Fundamental y un Postulado General por él establecidos y que hoy son considerados como axiomáticos e indiscutibles dentro de las Ciencias del Grafismo:[19]

- Principio Fundamental o Ley de la Individualidad de la Escritura. “El grafismo es individual e inconfundible” No existen dos grafismos iguales, pudiendo siempre distinguirse del otro.
- Postulado General. “Las leyes de la escritura no dependen de los alfabetos utilizados” Los alfabetos son creaciones del espíritu humano en diferentes culturas. No obstante, las leyes que rigen el grafismo se aplican en todos los alfabetos por igual.
- Leyes Universales de la Escritura:
 - 1) 1ra. Ley (Subordinación del Gesto Gráfico): Ley del Impulso. “El Gesto Gráfico está bajo la influencia directa del Cerebro”. Su forma no es modificada por el órgano escritor, si éste funciona normalmente y se encuentra suficientemente adaptado a su función.
 - 2) 2da. Ley: Ley de la Acción del “yo” Cuando se escribe, el “yo” está en acción, pero es sentimiento casi inconsciente de que el “yo” obra, pasa por alternativas continuas de intensidad y

debilidad. Está en su máxima intensidad donde existe un esfuerzo a realizar, esto es, en los inicios; y en su mínima, donde el movimiento escritural adquirido, esto es, en los finales, de manera que al final del escrito está más reflejada la verdadera personalidad, mientras que al principio está disimulada por intenciones o deseos.

- 3) 3ra. Ley: Ley de la Marca del Esfuerzo. No se puede modificar voluntariamente en un momento dado la escritura natural, sino introduciendo en el trazado la propia marca o signo del esfuerzo que se hizo para obtener la modificación, que se revela en desviaciones, interrupciones, retoques, etc.
- 4) 4ta. Ley: de la Permanencia de Características. El escritor que actúa en circunstancias en que el acto de escribir es particularmente difícil, traza instintivamente formas de letra que le son más habituales o más simples, de esquema más fácil de ser construido.

3.4. Técnicas digitales de procesado de la firma

Con la llegada de los adelantos tecnológicos todas las técnicas que durante la historia se fueron desarrollando y practicando de manera manual, se adaptaron a este nuevo entorno digital, que mediante patrones, series y comparaciones aporta a estas técnicas velocidad, accesibilidad y exactitud.

Estas técnicas de adquisición de firma escrita de forma digital se clasifican en dos grandes grupos: Técnicas off-line y técnicas on-line. En multitud de ocasiones en las que hay que efectuar el reconocimiento de firma sólo se dispone de éstas realizadas sobre papel. A la adquisición de este tipo de firma se le denomina captura off-line, debido a que la ejecución de dicha firma no coincide temporalmente con la adquisición de los datos. En este caso la firma se realizó en un momento indeterminado y posteriormente se efectuó la captura. Puesto que la información resultante de la ejecución de la firma es la imagen impresa en papel, la captura de la imagen consiste en la digitalización de dicha imagen. Por otro lado y mediante el empleo de dispositivos tales como tabletas digitalizadoras o acelerómetros acoplados

a bolígrafos, se puede realizar un muestreo temporal de la trayectoria del bolígrafo durante la ejecución de la firma. En este caso, el proceso de adquisición de los datos es simultáneo a la ejecución de la firma y se dice que la adquisición de los datos es on-line.

La principal diferencia entre los sistemas de adquisición on-line y off-line es la simultaneidad entre la realización de la firma y la adquisición de información de la misma. Como ya se mencionó la adquisición off-line consiste en la digitalización de la imagen de la firma. En este caso se pierde la información temporal, no se conoce su duración ni la secuencia ordenada de los trazos. Hay información de la dinámica y de la presión de la firma que se puede recuperar mediante el análisis minucioso de la dispersión de la tinta en el papel, aunque debido a la dificultad de extraer esta información de forma automática, se considera perdida. Esto hace que la información que se utilice normalmente en sistemas off-line se limite a información estática. En cambio, mediante la adquisición on-line no sólo se dispone de la información geométrica, sino también de la información dinámica y temporal de la firma: duración, secuencia ordenada de ejecución de los trazos, velocidades y aceleraciones de la mano, entre otras. Además dependiendo de las especificaciones del dispositivo empleado en la captura on-line, también se puede obtener información adicional como la presión instantánea ejercida a lo largo de la firma, o los ángulos de inclinación del bolígrafo.

3.4.1. Acondicionamiento de la señal de la firma

La etapa de acondicionamiento de la señal de la firma tiene básicamente tres objetivos:

- 1) Eliminar la información que no sea relevante para el reconocimiento.
- 2) Corregir la información degradada durante la adquisición.
- 3) Reducir la variabilidad entre distintas realizaciones de una misma firma.

La forma de implementar este preprocesado depende de la naturaleza de los datos disponibles y, por lo tanto, del tipo de adquisición efectuada. Esto lleva a diferenciar el preprocesado de firmas off-line y on-line.

Acondicionamiento para la firma off-line. Puesto que la adquisición off-line consiste en la digitalización de la imagen de la firma, las técnicas que se emplean en

el preprocesado de la información son básicamente técnicas de procesado digital de la imagen, por lo cual se llevan a cabo las siguientes etapas:

- 1) Binarización: Se puede realizar estableciendo un umbral fijo a priori o mediante algoritmos de cálculo automático del umbral a partir del histograma de niveles de gris de la imagen.
- 2) Eliminación de Ruido: Se puede realizar antes (mediante filtros pasa baja) o después del proceso de binarización (mediante la unión de trazos cortados o llenando huecos).
- 3) Segmentación: Consiste en aislar los trazos que contienen la información necesaria para caracterizar una firma. Se puede extraer toda la firma o solamente el cuerpo de la misma, eliminando los trazos estadísticos exteriores.
- 4) Normalización en Posición y Tamaño: Dependiendo del algoritmo de clasificación que se utilice a continuación, puede ser necesaria la normalización en posición (respecto al punto inicial) y en tamaño.

Acondicionamiento para la firma on-line. En el preprocesado de firmas capturadas on-line se busca obtener una representación robusta respecto a las tres variaciones geométricas básicas: rotación, traslación y escalado de las diferentes realizaciones de las firmas. Algunos ejemplos de preprocesado aplicados a la firma on-line son los siguientes

- 1) Alineamiento respecto a la posición: Algunos ejemplos de referencias comunes son el punto inicial o el centro de masas.
- 2) Normalización en rotación: Hay diversas opciones, como alinear respecto al ángulo de la trayectoria media, obtener una representación de la firma en coordenadas polares y normalizar respecto al ángulo medio, o normalizar respecto al eje de mínimo momento de inercia.
- 3) Normalización del Tamaño: Se suele normalizar respecto a valores extremos de las coordenadas, rangos de variación o estadísticos de primer y segundo orden.

3.4.2. Extracción de características y representación de la firma

Una vez capturada la información de la firma, es conveniente generar o seleccionar aquellas características que faciliten el reconocimiento. Para que las características elegidas representen de forma óptima a la firma deben cumplir dos requisitos:

- Deben ser discriminantes entre firmas verdaderas y falsificaciones.
- Deben permanecer estables ante las variaciones típicas de las firmas verdaderas.

De forma simplificada, una característica será buena cuando, para diferentes realizaciones de un mismo usuario, su varianza sea pequeña y su valor medio esté bien separado del valor medio obtenido para firmas falsas.

De igual forma las características extraídas de la firma se pueden clasificar atendiendo a varios criterios. Dos posibilidades son:

- En función de su naturaleza. En este caso podemos encontrar características dinámicas y estáticas. Las características dinámicas toman información temporal del proceso de realización de la firma (velocidades, posiciones, duraciones parciales o totales de levantamientos de trazos). Las características estáticas toman información geométrica de la firma (inclinación de los trazos verticales, localización de inicios y finales de trazos).
- En función del ámbito de representación. En este caso se distingue entre características globales y locales. Las características globales toman información de la firma en su totalidad como una unidad. Algunas características globales son: duración total, medias y desviaciones típicas y centro geométrico. Las características locales son aquellas que toman información de puntos o zonas específicas de la firma, ya sea en el dominio temporal o en el espacial. Entre las características locales típicas se pueden encontrar: valores instantáneos de los diferentes parámetros y puntos máximos y mínimos.

La fase de extracción de características va a influir en la forma final de estructurar el modelo o patrón de la firma. A continuación se introducen los dos tipos básicos de representación de firmas empleados en los diferentes sistemas de reconocimiento.

- 1) Representación paramétrica. En este caso las características consisten en un conjunto de parámetros o valores individuales calculados a partir de la información adquirida y procesada. Sus valores suelen agrupar en un vector que representa la firma. Algunos parámetros típicos que se pueden encontrar son: velocidad de escritura máxima, mínima y media, velocidades de escritura en los diferentes ejes, duraciones globales y locales, entre otras.
- 2) Representación mediante funciones. Otra forma de representar la firma es como una función temporal o espacial que refleja la evolución de ciertos parámetros a lo largo de la realización de la firma. Las representaciones temporales solamente se pueden aplicar sobre firmas adquiridas de forma on-line y consisten en el muestreo de los parámetros adquiridos mediante el dispositivo a una cierta frecuencia de muestreo y la extracción, a partir de éstos, parámetros adicionales. Algunas funciones temporales son: posición, presión, fuerza, entre otros.

4 IRIS



4.1. Introducción

La utilización del ojo humano en la identificación de personas ha dado lugar a dos técnicas biométricas diferentes: una basada en las características del iris ocular, y otra que utiliza las características distintivas de la retina. La única característica que comparten estas dos técnicas biométricas es la utilización del mismo órgano, el ojo humano, ya que el análisis del iris y de la retina da lugar a dos sistemas biométricos muy diferentes, tanto en la captura de la imagen y procesado de información, como en los métodos de comparación para la correcta identificación. Pese a ello es frecuente que ambas técnicas se confundan considerándolas como una única técnica denominada biometría del ojo (error frecuente en la literatura anglosajona).

Con el creciente desarrollo que han experimentado en los últimos años las tecnologías de la información, ha surgido la necesidad de desarrollar mecanismos que de forma automatizada permitan la identificación y verificación de un individuo utilizando características físicas y conductuales precisas, y específicas de ese individuo. En esta línea, los métodos tradicionales (tarjetas, claves, etc.) han cedido terreno a la biometría para diferenciar a los individuos. Una de sus aplicaciones se basa en el análisis del patrón del iris, esta técnica se caracteriza por su gran estabilidad y poder de discriminación.[20]

El patrón tisular característico del iris le confiere una gran utilidad desde el punto de vista biométrico, debido a su carácter permanente e inalterable, y a su alta variabilidad interindividual e incluso intraindividual, lo cual le ha dado el estatus de ser uno de los métodos biométricos más fiables, ya que se estima que la probabilidad de encontrar dos personas con un iris de idéntico patrón es casi nula (ni siquiera en gemelos monocigóticos se ha objetivado esta característica), incluso el patrón del iris de los dos ojos de una misma persona es diferente, no siendo las imágenes de los dos ojos intercambiables, dato que debe ser tenido en cuenta por el sistema. La misma gran variabilidad interindividual e intraindividual existe en el patrón vascular de la retina, dotando también a la técnica de análisis de retina de una fiabilidad extremadamente alta. La gran potencialidad del iris para la identificación biométrica radica en una serie de características propias, entre las que se encuentran; la estabilidad frente a cambios (por el papel protector de la córnea); el ser un sencillo mecanismo de detección de sujeto vivo (reacción a fotoestimulación); la captura de

datos (imagen) de forma no invasiva; o la dificultad de falsificación, lo que conllevaría operaciones quirúrgicas que podrían dañar severamente la visión..

4.2. Historia

Como ha quedado de manifiesto a lo largo de estas líneas, los ojos representan una fuente fiable de patrones biométricos, tanto mediante el análisis de la retina como de los patrones característicos del iris. El primer método biométrico apoyado en patrones oculares, fue un sistema basado en la retina patentado por Robert Hill en 1978, que hacía uso de imágenes oftalmológicas en primer plano de los patrones internos de distribución de la formación vascular retiniana del fondo del ojo.

A pesar de que el color característico del ojo de una persona fue usado como identificador en el siglo XIX, por el físico francés Alphonse Bertillon, la idea de que el complejo patrón del iris pudiera usarse como una especie de huella óptica, fue propuesta por primera vez por Frank Burch, un eminente oftalmólogo de St. Paul, en el año 1936, lo sugirió en el congreso anual de la Academia Americana de Oftalmología, en una de sus exposiciones.[21]

El concepto que se presentaba por aquel entonces, se reprodujo en diversos libros de texto, y la idea fue igualmente usada en películas de James Bond, y otras de ciencia ficción, sin producirse ningún otro progreso en más de medio siglo.

Fue en 1987, cuando dos oftalmólogos, Leonard Flom y Aran Safir, rescataron la idea patentándola y presentándosela dos años más tarde al profesor John G. Daugman, de la Universidad de Harvard, con el objetivo de crear los algoritmos necesarios para desarrollar correctamente un sistema eficaz de reconocimiento de iris. Pese a su reticencia inicial a participar en el proyecto, debido a su inminente traslado a la universidad de Cambridge, los dos oftalmólogos consiguieron atraer la atención del profesor Daugman, presentando sus ideas a través de fotografías del iris de diversos pacientes recogidas en su clínica. En estas imágenes, los iris presentaban complejos patrones aleatorios, creados por ligamentos arqueados, surcos, criptas, anillos, diversidad de pecas, una corona y un característico zigzag denominado collarete.

Los trabajos realizados por Daugman, que recogidos parcialmente en su trabajo titulado “High Confidence visual recognition by test of statistical independence”,

supusieron un avance definitivo en el campo de la identificación personal basada en el análisis del iris. Los algoritmos que desarrollo posteriormente, fueron patentados en 1994 (“Biometric Personal Identification System Based on Iris Analysis”), sentando las bases de los actuales sistemas y productos de reconocimiento de iris.[22]

Posteriormente, Aran Safir y Leonard Flor, fundaron conjuntamente con John Daugman la compañía Iris Corporation, poseedora de la patente y encargada de distribuir las licencias a las diferentes compañías desarrolladoras e integradoras de sistemas de reconocimiento, que quisiesen hacer uso de este sistema biométrico. Una de las empresas interesadas fue Sensar Corporation, que creó una cámara especial, capaz de obtener imágenes de iris en los cajeros automáticos. Estas dos compañías se unieron creando Iridian Technologies.

Agencias relacionadas con los cuerpos de seguridad y justicia, de los Estados Unidos, comenzaron a utilizar este tipo de dispositivos en 1994, siendo la prisión del estado de Lancaster (Pennsylvania), la pionera en el uso de esta tecnología para la identificación de los reclusos. Otro ejemplo puede encontrarse en el condado de Berkshire, donde la prisión estatal utiliza sistemas de reconocimiento basados en iris para el control de acceso y seguridad de sus empleados.

En un entorno más comercial y enfocado al público general, se ha implantado en el aeropuerto internacional Charlotte/Douglas en Carolina del Norte o en el aeropuerto de la ciudad de Frankfurt, donde se permite a los viajeros habituales registrar su patrón de iris con el objetivo de reducir el tiempo necesario y la complejidad del proceso de embarque. También, dentro del campo de la seguridad aeroportuaria, tenemos los ejemplos de las instalaciones de los aeropuertos Schiphol en la ciudad de Ámsterdam, JFK en Nueva York, o Heathrow en Londres, donde son empleados tanto para realizar el embarque de viajeros como en los controles de pasaportes e inmigración.

La utilización de estos dispositivos en los cajeros automáticos, es una de las aplicaciones que está experimentando una investigación más exhaustiva. También se considera muy interesante la utilización de estos sistemas de reconocimiento biométrico para el control de acceso y seguridad en entornos domóticos.

Entre las empresas que desarrollan este tipo de dispositivos y sistemas se encuentran Panasonic, LG, Oki, British Telecom, Unisys, Siemens o IBM.

Como curiosidad relacionada con el iris, se puede destacar, que existe una creencia popular en relación a que los rasgos propios del iris pueden revelar el estado de salud de una persona, algo parecido a los fundamentos de la reflexoterapia, de modo que algunos puntos del ojo estarían asociados a ciertos órganos del cuerpo, de manera que se pueden utilizar para leer el futuro o determinar posibles problemas de salud. Estas creencias y prácticas, reciben el nombre de iridiología, y ocasionalmente han sido tomadas en serio hasta el punto de realizar experimentos científicos que pudieran dar credibilidad a estas ideas. Sin embargo la conclusión ha sido siempre la misma, resultando un absoluto fracaso.

4.3. Anatomía del ojo

El ojo es el órgano de la visión en los seres humanos y en los animales. Los ojos de las diferentes especies varían desde las estructuras más simples, capaces de diferenciar sólo entre la luz y la oscuridad, hasta los órganos más complejos que presentan los seres humanos y otros mamíferos, que pueden distinguir variaciones muy pequeñas de forma, color, luminosidad y distancia. En realidad, el órgano que efectúa el proceso de la visión es el cerebro. La función del ojo es traducir las variaciones electromagnéticas de la luz, que detectan los fotorreceptores en un determinado tipo de impulsos nerviosos que se transmiten al cerebro.

El cuerpo humano está dotado de dos ojos, lo cual facilita una visión estereoscópica. . La organogénesis ocular comienza en el vigésimo quinto día de la fase embrionaria, finalizándose la génesis del esbozo ocular hacia la octava semana del desarrollo, continuando su maduración hasta la finalización de la gestación.

4.3.1. El globo ocular.

El globo ocular, es una estructura esférica de aproximadamente 2,5 cm de diámetro, con un marcado abombamiento sobre su superficie anterior. Se compone de tres capas de tejido:[23]

- La capa más externa, esclerótica, que tiene una función protectora, cubre unos cinco sextos de la superficie del globo ocular y se prolonga hasta la cara anterior del ojo, donde la estructura tisular varía, siendo más transparente y recibiendo el nombre de córnea.

- La capa media, úvea, que tiene a su vez tres partes diferenciadas: la coroides, que reviste las tres quintas partes posteriores del globo ocular y que se continúa con el cuerpo ciliar, que está formado por los procesos ciliares y a continuación el iris, que se extiende por la parte frontal del ojo.
- Por último la capa más interna es la retina, que es sensible a la luz

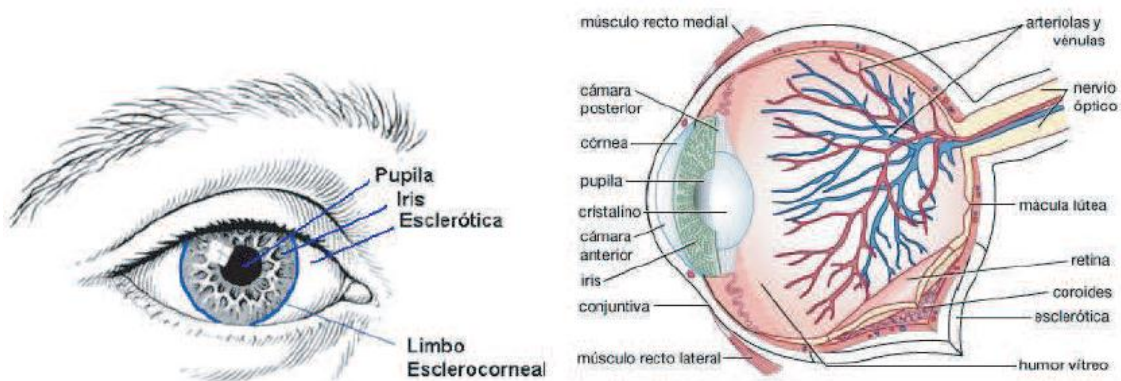


Figura 5. Anatomía de un ojo humano

4.3.2. La capa externa.

La córnea, situada en la capa externa y en el polo anterior del ojo, es una membrana resistente, compuesta por cinco capas, a través de la cual la luz penetra en el interior del ojo. En su cara posterior, hay una cámara que contiene un fluido transparente y húmedo (el humor acuoso) que separa la córnea de la lente del cristalino. En sí misma, la lente es una esfera aplanada constituida por un gran número de fibras transparentes dispuestas en capas. Esta lente está conectada con el músculo ciliar, que tiene forma de anillo y que la rodea mediante unos ligamentos. Este músculo ciliar y los tejidos circundantes forman el cuerpo ciliar y es la estructura encargada de acomodar la lente, modificando su longitud focal.

4.3.3. Las capa media e interna.

En la cara posterior del cristalino, el cuerpo principal del ojo contiene una sustancia transparente y gelatinosa (el humor vítreo) delimitado por un saco delgado que recibe el nombre de membrana hialoidea. La presión del humor vítreo mantiene distendido el globo ocular. La retina, situada en la región interna tras el humor vítreo,

es una capa compleja compuesta en su mayoría por células nerviosas. Las células receptoras sensibles a la luz se encuentran en su superficie exterior, sobre una capa de tejido pigmentado. Estas células tienen la forma de conos y bastones, y una disposición ordenada como los fósforos de una caja. Los conos son sensibles al color mientras que los bastones lo son a la luminosidad. En la Figura 7 (izquierda) se muestra una imagen ampliada de los conos y los bastones. Los bastones se conectan en grupo a las neuronas para producir una imagen general. Aunque mucho menos numerosos, los conos se unen de manera individual a las células nerviosas y generan una imagen detallada.[24]

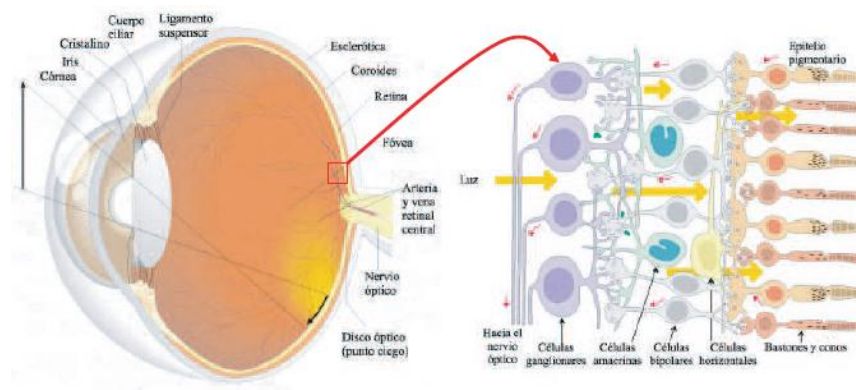


Figura 6. Fotoreceptores: bastones y conos

La retina tiene una pequeña mancha de color amarillo, llamada mácula lútea (Figura 8 centro); en cuyo centro se encuentra la fóvea central, la zona del ojo con mayor agudeza visual. La capa sensorial de la fóvea se compone sólo de conos, mientras que en torno a ella también se encuentran los bastones. Según nos alejamos de la fóvea central, las células con forma de cono se vuelven más escasas y en los bordes exteriores de la retina sólo existen las células con forma de bastones. El nervio óptico sale del globo ocular en la parte inferointerna de la fóvea central, generando en la retina una imagen redondeada que recibe el nombre de disco óptico. Esta estructura constituye el punto ciego del ojo, ya que carece de células sensibles a la luz. El ojo humano es receptivo a la radiación electromagnética que denominamos luz visible, con un intervalo de valores de longitud de onda que va desde los 350 nm a los 780 nm. La distribución de la sensibilidad del ojo a las distintas longitudes de onda tiene forma de campana con un valor máximo para los conos en torno a los 600 nm y un máximo para los bastones en torno a los 500 nm.



Figura 7. Imágenes ampliadas que muestran los fotorreceptores de la retina: conos y bastones (izquierda) y una sección de un iris (derecha).

4.3.4. Iris

El iris es una estructura pigmentada suspendida entre la córnea y el cristalino y tiene una abertura circular en el centro, la pupila. El tamaño de la pupila depende de la contracción o relajación de un músculo que rodea sus bordes, aumentando o disminuyendo su diámetro cuando se contrae o se relaja, controlando la cantidad de luz que entra en el ojo. En la Figura 8. (derecha) podemos observar una muestra de iris. Las fibras que se observan por encima de él forman parte del cuerpo ciliar, que contiene los músculos que alteran la curvatura del cristalino y modifica el centro luminoso en la retina.[25]

El cuerpo ciliar es el encargado de segregar el líquido conocido como humor acuoso, que ocupa el espacio entre la córnea y el iris así como la cavidad existente entre el iris y el cristalino.

4.3.4.1 Aspectos diferenciadores del iris

La estructura del iris de cada ojo muestra un alto grado de unicidad y estabilidad con el tiempo. El patrón se mantiene prácticamente invariable desde la infancia del individuo. La herencia genética sólo determina la estructura general, pero no el patrón detallado que se estabiliza a partir de la adolescencia. Solo durante la vejez se observa una ligera despigmentación (Figura 8 derecha) y una disminución de la apertura pupilar media. Sobre estos últimos datos, no existen pruebas exhaustivas sobre grandes poblaciones, por tanto los resultados no son concluyentes.

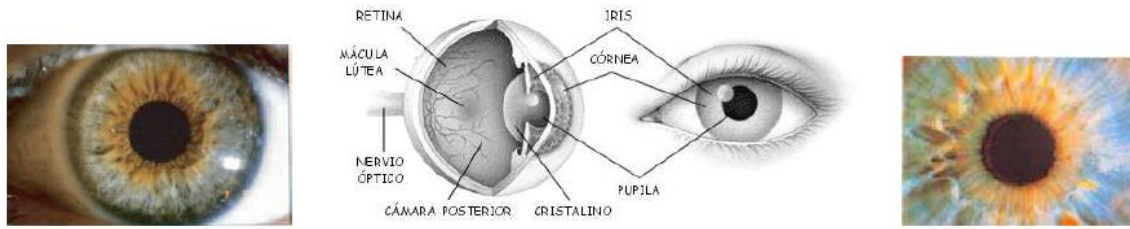


Figura 8. Vista frontal de ojo humano (izquierda y centro) y ejemplo de despigmentación (derecha).

El iris separa la cámara anterior de la cámara posterior del ojo. Tiene en su centro una abertura circular de diámetro variable, la pupila, que se modifica por la acción de los músculos ciliares graduándose de este modo la cantidad de luz que entra en el ojo según las condiciones ambientales, de manera que reduce la distorsión producida por la periferia de la lente.

El iris contiene células pigmentadas y musculares y consta de cuatro capas:

- La membrana limitante anterior formada por broblastos y melanocitos estrellados (con forma de estrella)
- El estroma, una capa de tejido broso constituido por colágeno en su mayor parte donde se encuentran broblastos ahusados (células del estroma), capilares sanguíneos, nervios y macrófagos pigmentados. Alrededor de la pupila, el estroma termina en el músculo esfínteriano de la pupila. Los capilares del iris suelen estar radialmente dispuestos y disponen de numerosos canales anastomósicos.
- La capa de músculo dilatador del iris se extiende desde la base del iris hasta el esfínter de la pupila.
- El epitelio posterior pigmentado compuesto de dos capas de células pigmentadas con melanina. La melanina tiene por objeto absorber luz y reducir la distorsión óptica.



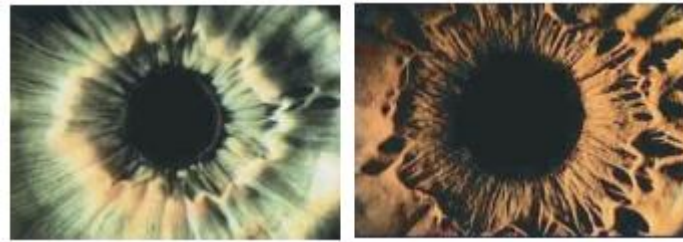


Figura 9. Cinco iris distintos

4.4. Fundamentos del reconocimiento del iris

De todos los sistemas de reconocimiento de identidad existentes en la actualidad, descritos en el primer capítulo, son pocos los procedimientos no invasivos, entre los cuales se encuentra el reconocimiento mediante iris. En un mundo como el actual tan convulso y vulnerable, los sistemas de reconocimiento para aplicaciones de seguridad están cada día mejor valorados, en especial si su implantación no suponen incomodidad para los usuarios, ni presentan métodos invasivos que supongan algún peligro para la integridad de las personas.

El reconocimiento por iris se basa en los detalles que presenta la textura del iris, que por características inherentes a su morfología presenta grietas, criptas o estrías entre otras características que conforman un patrón rico en detalles. Esta textura desarrollada en la etapa embrionaria es estocástica y posiblemente de generación caótica, lo cual determina que los fenotipos de dos iris con el mismo genotipo, presenten detalles no correlacionados, como ocurre en los gemelos homocigóticos.

La cantidad de información que presenta este indicador biométrico es tan considerable que permite la identificación de individuos con procedimientos no invasivos y que adicionalmente se desarrolla a distancias prudenciales y sin restricciones ambientales, con resultados muy fiables, lo que permite la implementación de sistemas de verificación de identidad aplicables a condiciones reales; en estos sistemas se debe dar gran importancia a los algoritmos de preprocesado y procesamiento como tal, debido a que la información efectiva con que se cuenta para lograr el proceso de reconocimiento de identidad es mucho menor a la conseguida en sistemas similares con imágenes bajo condiciones controladas de prueba y evaluación.

En un sistema que funciona bajo condiciones reales deben ser tomadas en cuenta ciertas consideraciones, por ejemplo que dos imágenes del mismo iris pueden estar ubicadas de manera diferente en la imagen, o con pequeñas rotaciones entre ambas, o adicionalmente pestañas y párpados pueden interferir en la información efectiva del iris, siendo éste un parámetro muy importante a considerar, sobre todo en nichos de población como el asiático, donde es más pronunciado este efecto, debido los característicos ojos rasgados.[26]

Las variaciones de la imagen introducidas por las fuentes de luz, que pueden ser disminuidas con los sistemas de adquisición actuales, aunque pueden representar dificultades sustanciales en el proceso de verificación de identidad.

El iris es un tejido conectivo, que al igual que el árbol vascular retiniano tiene una estructura única por individuo que forma un sistema muy complejo, de modo que la probabilidad de encontrar dos irises idénticos es de 1 entre 1078, inalterable durante toda la vida de la persona, este es el factor que propicia el que el iris sea un rasgo de elevadas prestaciones en los sistemas biométricos. Adicionalmente, encontramos el factor de que esta estructura alberga gran cantidad de información, muy propicia para el análisis biométrico ya que contiene alrededor de 266 características distintivas, entre las que se encuentra el retículo trabecular, que conforma un tejido que da la sensación de dividir el iris radialmente, así como estriaciones, anillos, surcos, pecas y la corona característica, de las cuales la tecnología de reconocimiento de iris hace uso de cerca de 170.

La identificación basada en el reconocimiento de iris se viene utilizando para la autenticación de usuarios desde hace ya varios años. Para llevar a cabo el proceso, se hace uso de una cámara de elevada precisión, que permite obtener imágenes de alta resolución en blanco y negro del ojo del usuario, en un entorno correctamente iluminado.

Generalmente esto se realiza mirando a través de la lente de una cámara fija, la persona simplemente se coloca frente a la cámara y el sistema automáticamente localiza los ojos, los enfoca y captura la imagen del iris, ésta imagen se somete a deformaciones pupilares (el tamaño de la pupila varía enormemente en función de factores externos, como la luz) y de ella se extraen patrones, que a su vez son sometidos a transformaciones matemáticas hasta obtener una cantidad de datos

(típicamente 256 Kbyte) suficiente para los propósitos de autenticación. Esa muestra, denominada IrisCode es comparada con otra tomada con anterioridad y almacenada en la base de datos del sistema, de forma que si ambas coinciden el usuario se considera autenticado con éxito; la probabilidad de una falsa aceptación es la menor de todos los modelos biométricos.

El uso por parte de un falsificador de una réplica para conseguir una falsa aceptación es casi imposible con análisis infrarrojo, capaz de detectar con una alta probabilidad si el iris es natural o no.

Es por todo lo anteriormente expuesto por lo que este identificador es uno de los más precisos entre los sistemas biométricos.

Además de su alta precisión los sistemas de reconocimiento biométrico basados en iris presentan las siguientes ventajas:

- Sistema no invasivo. El usuario debe situarse frente al sistema de captura pero no es necesario mantener contacto con él.
- El sistema es invariable al uso de lentes de contacto o gafas, ya que estos elementos no modifican la estructura de ojo. También se trata de un sistema invariable a las lentes de contacto de colores, al no responder el color del ojo a ningún grado de libertad dentro del sistema.
- Presentan elevadas tasas de reconocimiento.

Los inconvenientes relacionados con el reconocimiento de patrones de iris son los que ahora se presentan:

- Elevado coste.
- Requiere determinadas condiciones de iluminación en la fase de captura de la imagen del iris, para que ésta se válida durante la creación del patrón correspondiente.
- Existen enfermedades que pueden afectar negativamente al reconocimiento de las características del iris.
- Resulta complicado el reconocimiento de los ojos oscuros.

4.4.1. Partes de un sistema de reconocimiento

Aunque en el primer capítulo ya se repasaron las principales partes de las que debe constar un sistema de reconocimiento ahora se pasará a distinguir estas etapas para el caso concreto del iris.

Una de las primeras fases del sistema sería la adquisición de la imagen del iris. Posteriormente se lleva a cabo una etapa de preprocesado de la imagen, en la que se localiza y aísla la estructura del iris, detectando sus límites exterior e interior (frontera con la esclerótica y la pupila respectivamente). También se procederá a la normalización del tamaño de la imagen durante esta etapa del sistema.[27]

El paso siguiente será realizar la extracción de características de la imagen del iris preprocesada, con el objetivo de determinar una muestra correcta, que posteriormente será comparada con el patrón almacenado en la fase de reclutamiento.

El sistema de reconocimiento finalizará con la etapa de comparación, en la que se pueden aplicar diferentes algoritmos, como por ejemplo los basados en la mínima distancia entre el patrón de almacenado y los modelos obtenidos en cada una de las capturas realizadas cuando un individuo utiliza el sistema.

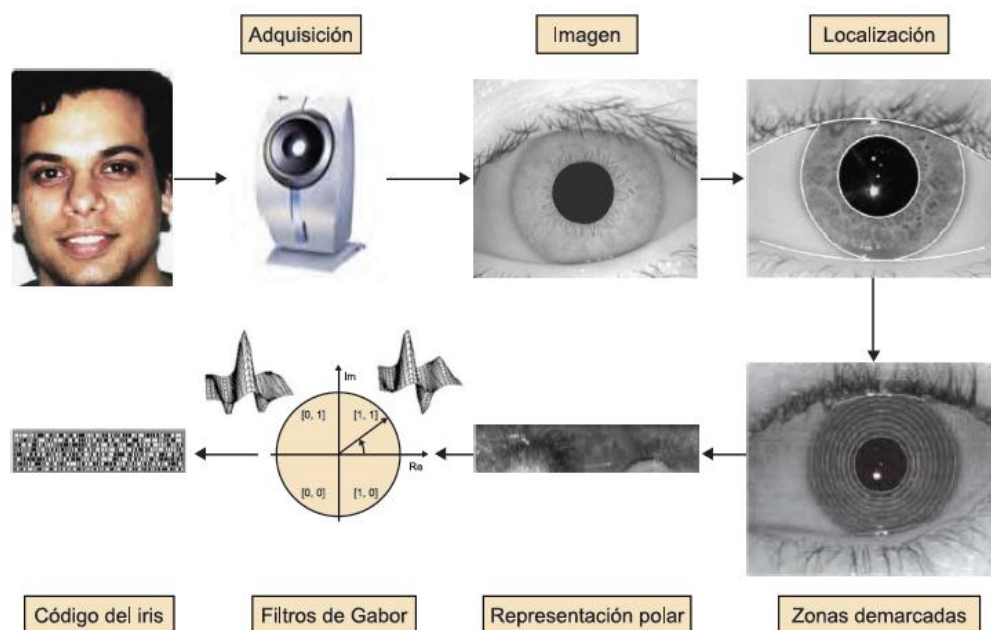


Figura 10. Partes de un sistema de reconocimiento de iris

4.4.1.1 Proceso de adquisición de la muestra

La captura de la imagen del ojo del individuo no es un proceso sencillo, debido al reducido tamaño del iris. En esta captura de la imagen del ojo de una persona deberán ser tenidos en consideración algunos aspectos, como la distancia entre el sujeto y el dispositivo de captura, o las condiciones de iluminación existentes. Una mala iluminación o una distancia errónea entre la persona a identificar y la cámara con la que se realiza la captura, puede derivar en la toma de una imagen del iris con una calidad insuficiente para poder conseguir extraer unas características viables del mismo que permitan realizar un correcto reconocimiento. A pesar de que la luz natural también se puede usar con este propósito, los iris con pigmentos más oscuros revelan mayor complejidad de sus patrones si no se tratan con la luz adecuada.

La imagen del iris se captura desde una distancia de entre 10 y 20 cm., es decir, de manera no invasiva para el usuario, mediante una cámara de alta resolución, que tras un proceso preliminar de enfoque del objetivo y un posterior descarte de los reflejos producidos por las gafas de un usuario, obtiene la imagen digital del iris. Las posibles variaciones de la pupila, debidas a la luz usada, no interfieren en ningún caso en la aleatoriedad o unicidad de los patrones de iris, más allá de esto, estas posibles variaciones pueden ser de utilidad, a la hora de confirmar que el iris es real y no una copia, en la cual la pupila no sufriría dilataciones o contracciones frente a un estímulo luminoso.

La imagen capturada en un primer momento contiene componentes útiles, que serán utilizados en el proceso de identificación y otros componentes irrelevantes para el sistema (por ejemplo, la pupila, los párpados, etc.).

Estas características como por ejemplo, el hecho de que el iris esté cortado en parte por los parpados, las pestañas o por gafas o lentes de contacto, pueden sin embargo, aumentar la complejidad del escaneo. Además, incluso en ausencia de estos obstáculos, el proceso completo de adquisición de la imagen del iris con propósitos de reconocimiento, requiere cámaras de alta precisión dado que el iris es una porción relativamente pequeña, de aproximadamente 1 cm., con movimiento, y localizado bajo una superficie curva, mojada y altamente reflectante.[28]

Por ello es necesario tener en cuenta dos puntos fundamentales.

- El primero, el factor de iluminación usado para el proceso, ya que en condiciones de iluminación con luces infrarrojas, incluso los iris de color muy oscuro revelan fácilmente sus patrones, mientras que haciendo uso de cámaras con iluminación en el rango del visible, el resultado dependerá de la pigmentación del iris.
- El segundo punto comprende la disposición del usuario, ya que en este caso el nivel de aceptación del usuario suele ser menor que en el uso de otros rasgos biométricos, debido a que los usuarios suelen sentir incomodidad durante el proceso de reclutamiento, principalmente debido al hecho de no tener claro hacia dónde enfocar la mirada en la cámara.

4.4.1.2 Extracción de características

La primera tarea en este apartado, consiste en determinar la situación geométrica exacta del iris dentro de la imagen recogida. Para ello es necesario determinar puntos como el centro del iris y el de la pupila, ya que los últimos estudios revelan que ambos círculos no son concéntricos. Asimismo es necesario determinar los límites de los parpados, y excluir la pupila y las pestañas de la imagen, creando de este modo un iris invariante al tamaño, distancia, ampliaciones o posibles movimientos naturales de la pupila. El siguiente paso, es crear el IrisCode, que consiste en un número de hasta 2048 bits, mediante el uso de algoritmos desarrollados a tal efecto, y que se almacenará en una plantilla, en la que se hacen uso de 256 bytes para el IrisCode además de otros 256 de máscara.

Esto permite almacenar la información en bases de datos locales o remotas, o incluso en dispositivos portátiles como smart cards o tokens. La plantilla pese a presentar hasta un 80% menos de información, que el IrisCode original, no deteriora en ningún caso la validez de los procesos estadísticos de toma de decisiones, llevados a cabo posteriormente.

4.4.1.3 Comparación de plantillas

Ambos procesos de verificación o identificación, implican el tener que tomar una imagen en vivo del iris del usuario, y comparar el resultado con la plantilla específica almacenada, en el caso de la verificación, o con un número determinado de plantillas guardadas en la base de datos, en el caso de la identificación. El proceso de

cotejar ambas plantillas, se puede realizar mediante una comparación bit a bit de ambas (operador lógico OR Exclusivo), a través de un proceso muy rápido de cálculo de la distancia Hamming entre ambos códigos, además de mediante otras posibles medidas de distancias similares, o incluso métodos de medida de la correlación entre las dos imágenes del iris.[29]

4.4.1.4 Proceso de decisión

Como en el caso de los demás sistemas biométricos, el proceso de comparación produce un resultado que se utilizará posteriormente en el proceso de decisión, que compara el resultado específico, con un umbral de decisión ajustado a la aplicación. En el caso del reconocimiento de iris, este umbral puede calcularse de manera ajustada para determinar un porcentaje de 0 aceptaciones erróneas, independientemente del número de entradas de la base de datos, en el caso de la identificación, y asegurando igualmente unas tasa mínimas de rechazos falsos.

4.5. Aplicaciones

Algunas de las aplicaciones del reconocimiento de iris son actualmente: control de inmigración y de paso de fronteras (haciendo uso de los métodos de verificación, identificación y búsqueda en listas), seguridad en aviación civil, control de acceso en áreas restringidas, casas u otros edificios, acceso de usuarios a bases de datos.

Hay un amplio abanico de posibles usos de esta tecnología en programas de ayuda social, acceso y puesta en marcha de vehículos, aplicaciones forenses y policiales, y en general cualquier otra operación que vincule secretos o claves con la identificación personal.

El uso más extendido actualmente, se encuentra en los 17 puntos de entrada (por mar, aire y tierra), de los Emiratos Árabes Unidos. En el Control de Inmigración, se examinan e identifican a todos los pasajeros, en relación a una base de datos de cerca de 420000 IrisCodes, de personas que se encuentran expulsadas de este país. Después de 3 años en operativo, y con una media de 6500 pasajeros accediendo cada día, lo que hace un total de 2,1 millones de pasajeros identificados, se obtuvieron cifras de alrededor de 9500 personas identificadas dentro de la lista de personas con

acceso no permitido, que hacían uso de identidades falsas para tratar de acceder ilegalmente al país, valorándose el sistema como de gran eficacia y rapidez (Daugman, 2004). Este mismo sistema, fue puesto a prueba de manera efectiva en el aeropuerto de Schiphol (Países Bajos), el aeropuerto de Frankfurt (Alemania), y diversos aeropuertos de Canadá y del Reino Unido, durante el año 2004. Más allá de esto, en la frontera entre Pakistán y Afganistán, la Comisión de refugiados de las Naciones Unidas, hizo uso de Sistemas basados en el reconocimiento de iris para la identificación anónima de refugiados afganos que retornaban a su país.

En términos de aceptación por los usuarios, queda claramente definido que este sistema no conlleva las connotaciones negativas de los sistemas biométricos basados en huellas dactilares. Por otra parte, el proceso de reclutamiento, no conlleva ningún contacto, y hace uso de tecnología de video y fotografía, más familiar para el público en general. Sin embargo, los primeros usuarios del sistema declararon en su momento, que este procedimiento creaba una situación incómoda para el usuario, y que la calidad de la imagen obtenida es un punto crítico para el éxito de la posterior fase de reconocimiento.

El uso de la tecnología en estos procesos de reconocimiento, para tratar de minimizar el uso y acceso fraudulento, puede llegar a crear sin embargo un estigma social similar al creado en el reconocimiento de las huellas dactilares.

5

HUELLA DACTILAR



5.1. Introducción

Desde la antigüedad se han utilizado diferentes partes del cuerpo para identificar a las personas, prueba de ello son las evidencias arqueológicas que relacionan huellas con identidad, y más formalmente en los primeros trabajos científicos del siglo XVI donde aparecen estudios de formación anatómica, caracterización del cuerpo, y concretamente, en el ámbito de identificación de los siglos XVII-XIX. Más adelante, durante el siglo XX, algunos rasgos biométricos, como las huellas, son aceptados como método de identificación y pruebas en procesos judiciales.

En la actualidad el reconocimiento automático de la huella dactilar se ha consolidado como el rasgo biométrico más utilizado en el mercado, tanto es así que acapara casi el 50% del mismo. Esto se debe a la gran riqueza de información que podemos obtener de cada dactilograma, que son las figuras formadas por el relieve de las crestas del dedo, y gracias a los procesos de digitalización de la huella se ha facilitado enormemente el procedimiento de extracción de los puntos característicos llamados minucias.[30]

La huella dactilar pertenece al grupo de rasgos biométricos fisiológicos, y supone un método sólido de identificación de individuos debido a la reducida variabilidad a lo largo del tiempo. No obstante se precisa de cierta cooperación por parte del individuo, para que la imagen adquirida de la huella tenga la suficiente calidad, como para permitir el empleo de algoritmos de reconocimiento sencillos. En muchas aplicaciones, las condiciones de adquisición no son lo suficientemente favorables y, por tanto, la mala calidad de las huellas adquiridas obliga al empleo de algoritmos complejos, tanto en la etapa de extracción de características, como en la etapa de reconocimiento de patrones.

5.2. Historia

La dactiloscopia es la ciencia sobre la que se basa el reconocimiento de huellas. El término dactiloscopia proviene del griego daktilos (dedo) y skopein (examinar). Y el origen de esta ciencia se remonta a los más lejanos tiempos, ya que se han encontrado representaciones palmares y dactilares de huellas humanas en

pinturas rupestres en las cuevas de Altamira (España), Marsolan (Cargas) y Font-de-Gaune (Francia) entre otras.

Existen suficientes hallazgos arqueológicos que indican que las huellas dactilares se han venido utilizando en la identificación de individuos desde el año 6000 A.C. por diversas poblaciones chinas y asirias. Entre ellos, cabe destacar, los restos de cerámica en arcilla con impresiones dactilares, que sugieren el empleo de las mismas como medio para identificar al alfarero. Algunos documentos chinos de la época presentan también sellos estampados con la impresión del pulgar del firmante. Los ladrillos utilizados en las casas de la antigua ciudad de Jericó eran a veces marcados por la impresión del pulgar de los trabajadores.[31]

El primer estudio científico publicado sobre la estructura de crestas, valles y poros de las huellas dactilares data de 1684, realizado por el morfologista inglés Nehemiah Grew. Desde entonces han sido mucho los investigadores que han trabajado en este campo.

En 1823, Porkinje propuso un esquema de clasificación de huellas en nueve clases atendiendo a la configuración de la estructura de las crestas. En general los estudios de principios de 1800 llegaron a dos importantes conclusiones que, hasta hoy, han servido de base para el reconocimiento biométrico, especialmente en entornos forenses: la no existencia de dos huellas de individuos diferentes con un patrón de crestas coincidentes, y la invariabilidad en el tiempo de dichos patrones durante toda la vida del individuo.

En 1858 Sir William Herschel, trabajador del servicio civil de la India, imprimió la huella de la mano al reverso del contrato de cada trabajador, para distinguir los empleados de otros que intentaran suplantar a los trabajadores el día de pago.

Henry Faulds publicó el 28 de octubre de 1880 en Nature, un artículo sobre cómo identificar criminales a partir de sus huella digitales llamado “On the Skin-Furrows of the Hand”

Sir Francis Galton publicó en 1892 un libro llamado “Finger Prints”, detallado estudio de huellas digitales en donde presentó un nuevo sistema de clasificación usando las huellas de los 10 dedos de las manos. El método lo llamo Galtoneano o Icnofalangometría.[32]

Después de todas estas primeras reseñas históricas podemos afirmar que el verdadero padre de la dactiloscopia fue Juan de Vucetich, quien partiendo de las ideas de Bertillón (un modesto empleado del Servicio de Identidad de París, que presentó en el año 1879, a la Prefectura de Policía el sistema antropométrico que llevaría su nombre. Este sistema, que en 1.888 obtiene su consagración en Francia, aplicándose de forma obligatoria en todo el país), clasificó las huellas dactilares bajo una relación directa entre la presencia y ausencia de deltas en las mismas. Esto le permitió en 1.892 resolver el primer caso policial utilizando huellas dactilares. Una mujer de nombre Francisca Rojas asesinó a sus dos hijos. Luego se cortó la garganta, no produciéndose una herida fatal sino leve. Ésta acusó a su vecino como el autor de los hechos, pero Juan Vucetich utilizando la huella latente encontrada en el cuchillo demostró que la señora Rojas fue quien dio muerte a sus dos hijos. A partir de este hecho se dio gran importancia desde el punto de vista identificativo a las huellas dactilares.

A principios de 1900, se admitieron las siguientes características biológicas de las huellas dactilares como base de identificación de individuos:

- 1) La estructura de crestas y valles de la epidermis de cada individuo, es única y representa unívocamente su identidad.
- 2) La estructura de crestas y valles de un individuo, aunque puede variar, lo hace dentro de unos límites tan reducidos, que hacen posible una clasificación sistemática.
- 3) Los detalles de las estructuras de crestas y valles, así como las minucias, son particulares de cada individuo e invariables en el tiempo.

La primera y tercera característica constituyen los principios por los que se rige la identificación de individuos por sus huellas dactilares. La segunda característica constituye el principio que permite la clasificación de huellas dactilares.

En 1918 Edmond Locard afirmó que si 12 puntos o detalles Galton coinciden en una comparación de dos huellas digitales, es suficiente para una identificación positiva, sin embargo, no hay un estándar mundial sobre el uso mínimo de puntos para identificación positiva, así pues algunos países tienen sus propios estándares al respecto. En concreto en España el sistema judicial ha fijado dicho umbral entre 8 y 10 minucias coincidentes, dependiendo de la probabilidad de aparición de las mismas.

La primera patente que registra el uso de huellas digitales es la No.2530758 del 21 de Noviembre de 1950 en Estados Unidos, y se trataba de una cámara de identificación y huellas digitales, desarrollada por William T. Cirone.

El FBI consolidó en 1975 el uso de escáneres y tecnología para la extracción de minucias, que llevó al desarrollo de un prototipo lector. Sólo se almacenaban las minucias de la huella digital y los lectores usaban técnicas capacitivas para recolectar las características de las huellas digitales

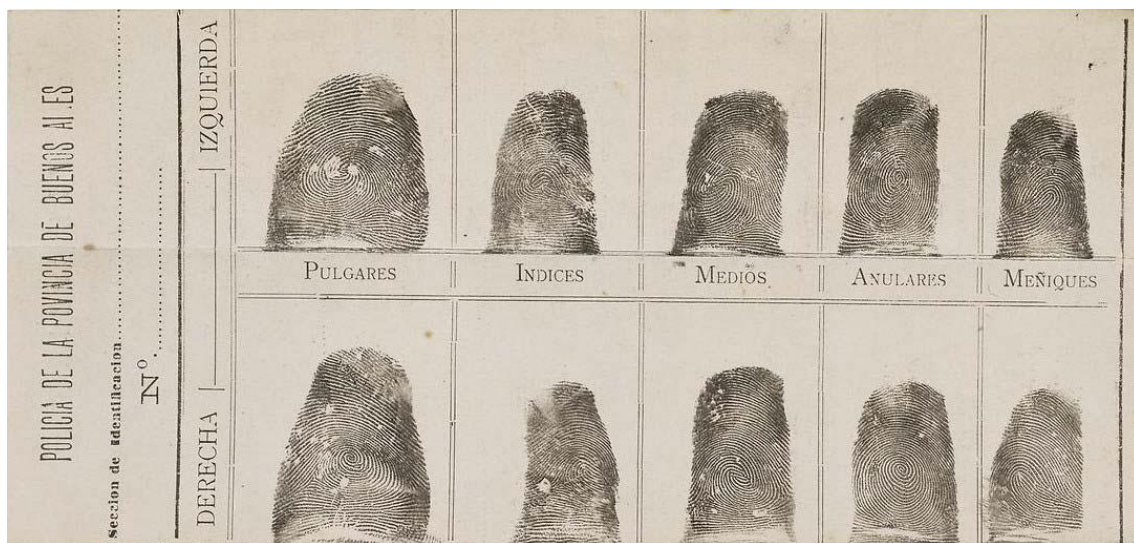


Figura 11. Ficha Dactiloscópica de Francisca Rojas

5.3. Formación de las huellas dactilares

La piel es el mayor órgano del cuerpo humano o animal. Ocupa aproximadamente 2 m² y su espesor varía entre los 0,5 mm (en los párpados) a los 4 mm (en el talón). Su peso aproximado es de 5 kg. Actúa como barrera protectora que aísla al organismo del medio que lo rodea, protegiéndolo y contribuyendo a mantener íntegras sus estructuras.[33]

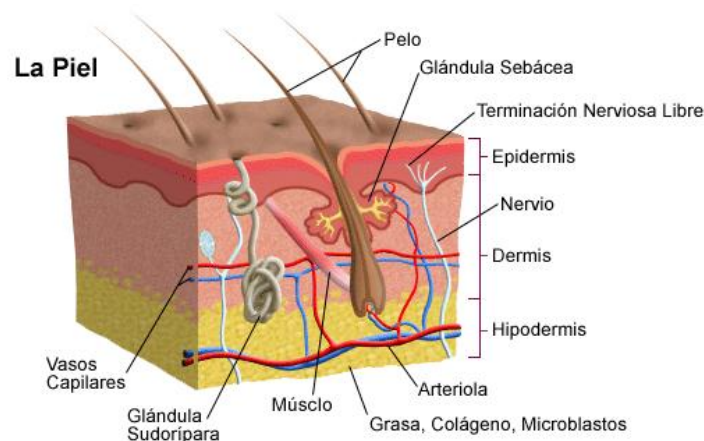


Figura 12. Piel humana, corte transversal

La piel humana tiene tres capas, como podemos ver en la Figura 12: la hipodermis, que es más profunda; la epidermis, que es más superficial y la dermis que se encuentra entre ambas. La dermis tiene dos extractos: un extracto más interno o extracto subcutáneo; y un extracto más externo o extracto papilar formado por las papilas dérmicas. Según estén dispuestas estas papilas dérmicas así lo estarán también, pues son su origen, las crestas papilares. Las papilas dérmicas se proyectan hacia la superficie dando lugar a la formación de los relieves llamados crestas papilares. Las crestas papilares, en identificación, son los relieves epidérmicos que formando muchos dibujos aparecen visibles en la cara palmar de las manos y en la cara plantar de los pies. Las crestas están separadas entre sí por unas fisuras o depresiones, llamados surcos papilares o interpapilares. Podríamos comparar esto con una tierra labrada donde el lomo de la tierra arada sería la cresta papilar, mientras que el surco de la tierra sería el surco papilar o interpapilar. El lomo de la cresta es redondeado y está invadido por una multitud de orificios microscópicos (poros) por donde se excreta el sudor.

El origen de las huellas está en las excreciones cutáneas (sudor y materia sebácea), que los dedos dejan al tocar objetos, superficies... Son las huellas latentes. Éstas también están compuestas por una serie de elementos: agua en más del 99%, cloruro sódico, aminoácidos (arginina, tiroxina...), ácidos grasos y proteínas.

Características de las crestas:

- Son comunes a todos los seres humanos.

- Son perennes; permanecen a lo largo de toda la vida y se forman en el sexto mes de la vida intrauterina, no desapareciendo hasta que tiene lugar la descomposición del cadáver. Si el cadáver es embalsamado duran eternamente (momias egipcias presentaban crestas papilares después de 25 siglos).
- Son inmutables; no cambian salvo accidentes. El dibujo no se modifica fisiológicamente. El recién nacido lo conserva hasta después de su muerte, creciendo al mismo ritmo que el cuerpo humano. Si sufre modificaciones accidentales que no afecten a la dermis (capa intermedia), se regeneran.
- Son diversiformes; distintas en todas las personas, no hay ninguna igual.
- Son clasificables; permiten su clasificación y formulación. Los dibujos se llaman lofogramas.

5.4. Adquisición de huellas dactilares

Una vez conocido el gran poder discriminante de las huellas dactilares, el problema que surge es, ¿cómo almacenar toda esta información de una forma eficaz? En los siglos XVIII, XIX y XX con la explosión de la huella como sistema veraz de identificación se capturaba humedeciendo la yema de los dedos en tinta y presionando el dedo contra una tarjeta de papel. Con el desarrollo de la tecnología se pasó al mundo digital y estas tarjetas fueron escaneadas para su mejor almacenamiento y consulta.

En las últimas décadas, gracias a la proliferación de sistemas de adquisición electrónicos, ha dejado de ser necesaria la adquisición con tinta. El mercado, viendo la gran demanda de sistemas de captura digitales que se ha producido, ha respondido ofreciendo un amplio catálogo de sensores capaces de capturar un dactilograma.[34]

Estos sistemas de captura en vivo se pueden fabricar bajo multitud de variantes tecnológicas aunque se pueden agrupar en una de estas familias: Ópticos, Estado Sólido, Ultrasónicos y Sin contactos. Independientemente de la familia tecnológica a la que pertenece el sensor, en el mercado existen dos líneas de productos, los sensores de huella dactilar estáticos y los sensores de huella dactilar por desplazamiento.

5.4.1. Sensores estáticos

Hacen uso de una ventana de captura de imagen que tiene el tamaño requerido para la huella dactilar, apoyando el dedo sobre esta ventana durante el tiempo necesario para la captura de la imagen. Este método tiene la ventaja de capturar la imagen en una única operación. Entre sus desventajas destacan el gran tamaño del dispositivo, incrementando su coste y dificultando la portabilidad, además la posibilidad de que permanezca una huella latente en la ventana de captura la convierte en un poco menos segura.

5.4.2. Sensores de desplazamiento

Esta tecnología consiste en el uso de una ventana rectangular con una anchura capaz de cubrir el ancho del dedo y unos pocos píxeles de altura, por lo que para obtener la huella dactilar completa, el sensor debe capturar imágenes continuamente mientras el dedo se va desplazando por la superficie.

Están basados en la tecnología del silicio, resultan más baratos de fabricar, requieren poco mantenimiento, prestan gran precisión, un bajo consumo y portabilidad.

Permite reducir el área del dispositivo en un factor de 5, así puede ser usado en un amplio número de sistemas empotrados, incluyendo sistemas de control de acceso, PC, PDA... usándose en cualquier situación o lugar siendo rápido, fiable y preciso, tanto para Identificación como Autenticación.

Puede considerarse como “autolimpiable”, pues el propio desplazamiento del dedo sobre la superficie del sensor imposibilita que permanezcan huellas latentes aumentando la seguridad. Seguridad que se ve reforzada por la dificultad de obtener imágenes fiables habiendo forzado a un individuo a usar el dispositivo, debido a movimientos erráticos o dedos sudorosos y ante la dificultad de desplazar un dedo artificial con suficiente sensibilidad como para poder reconstruir una huella.

Siempre que el desplazamiento del dedo sobre la superficie del sensor se realice a una velocidad apropiada, el solapamiento de sucesivos fotogramas, debe permitir la reconstrucción de la huella dactilar, a través de la información de la velocidad de desplazamiento proporcionada por el sensor o estimada por la información del solapamiento de capturas consecutivas.[35]

Este sistema, debido a la distorsión generada en la captura por el movimiento del dedo, requiere una corrección de esta distorsión una vez la huella dactilar haya sido reconstruida.

5.4.3. Tecnologías de sensores de huella dactilar

Existen multitud de tecnologías desarrolladas para los sensores de huella dactilar y otras están aún en desarrollo. De todas ellas, quizás las más demandadas sean las ópticas y las de estado sólido; capacitiva, térmica... en esta sección se introducirá cada una de ellas y se valorará cual presenta mayores prestaciones.

5.4.3.1 Ópticos

Se tratan de una variante de cámara digital que captura la imagen de la huella dactilar cuando la yema del dedo se apoya en una ventana de cristal, debidamente iluminada. Los principales inconvenientes de esta tecnología son: las huellas latentes en el cristal que se van acumulando en sucesivas lecturas y que puede ser engañado con imitaciones de huellas.

Los sistemas de captura ópticos se desarrollan con distintas tecnologías que se presentan a continuación.

FTIR

Es la más antigua y usada de las técnicas de adquisición de huella dactilar en la actualidad.

Consiste en la adquisición de la huella a partir de la luz reflejada a través de un prisma piramidal invertido, el dedo se apoya en un cristal situado en la base del prisma, produciéndose un contacto directo entre las crestas y el cristal y un espacio entre los valles y el cristal; desde un lateral del prisma se aplica una luz hacia la base del mismo que será totalmente reflejada en las zonas de valle y ligeramente absorbida en las zonas de cresta.

Obteniéndose así la imagen de la huella en la otra cara del prisma y capturada por las cámaras. Entre los inconvenientes de esta técnica está la distorsión trapezoidal sobre la imagen que debe ser corregida.

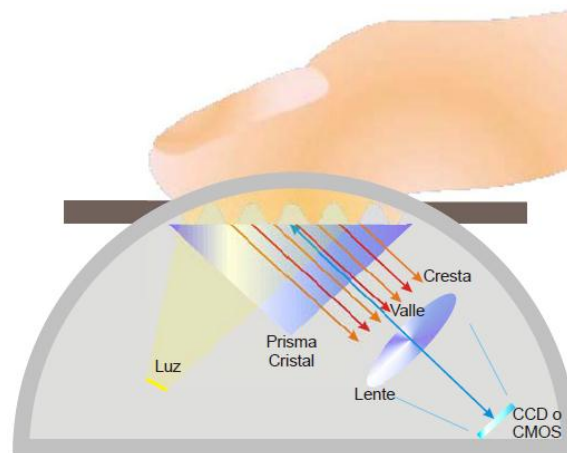


Figura 13. Sensor FTIR

FTIR con un conjunto de Prismas

Es una alternativa para reducir el tamaño de los FTIR, consiste en sustituir el prisma por un conjunto de pequeños prismas alineados y aunque el objetivo de reducción del tamaño se alcanza, empeora la distorsión de la imagen adquirida.

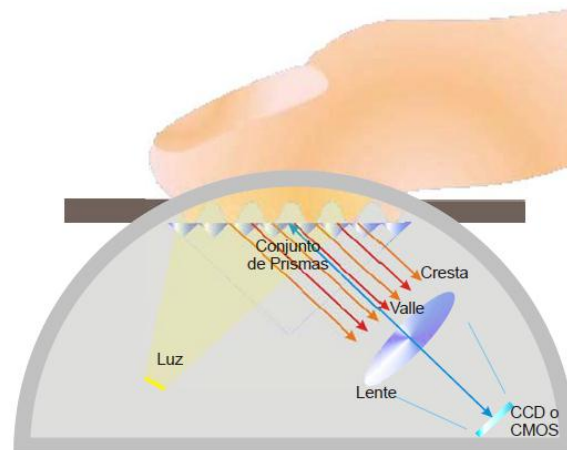


Figura 14. Sensor FTIR con conjunto de prismas

Fibra Óptica

Una mayor reducción del tamaño en los sensores de huella dactilar ópticos se consigue al sustituir el prisma y las lentes por una pletina de fibra óptica. El dedo entra en contacto directo con un lado de la pletina de fibra, mientras que el otro está unido al receptor óptico, bien CCD o CMOS.

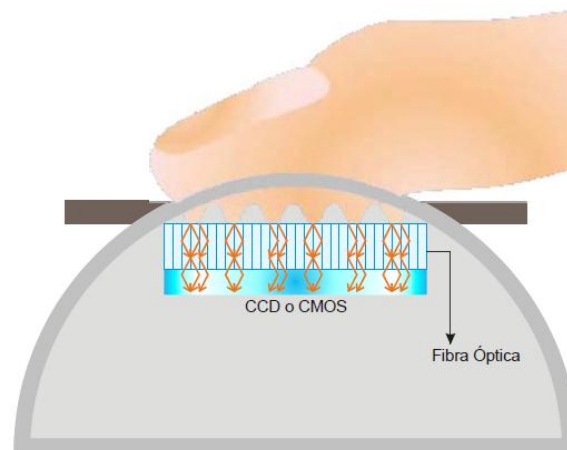


Figura 15. Sensor de Fibra Óptica

Electro-Óptico

Estos sensores constan de dos capas principales; la primera de ellas está formada por un polímero capaz de emitir luz en función del voltaje aplicado en una de sus caras. Una vez más como las crestas tocan el polímero y los valles no, existe una diferencia de potencial entre unas zonas y otras y la cantidad de luz emitida varía. La segunda capa que está unida a la primera, está constituida por un array de fotodiodos encargados de transformar la luz recibida en la imagen digital. A pesar de la gran reducción del tamaño, la calidad de la imagen de estos sensores no es comparable a la obtenida con los FTIR.

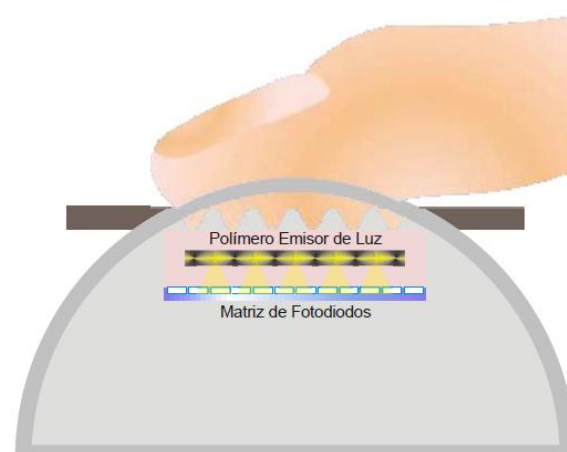


Figura 16. Sensor Electro-Óptico

Ultrasónicos

La adquisición por ultrasonidos, se puede ver como una especie de ecografía. Se basa en el envío de señales acústicas hacia la yema del dedo y capturar el eco para tras su procesado poder representar la huella dactilar.

El dispositivo consta de un transmisor, que genera pulsos acústicos, y el receptor, que detecta la respuesta cuando los pulsos transmitidos rebotan en la superficie del dedo de distinta manera si inciden sobre un valle o una cresta.

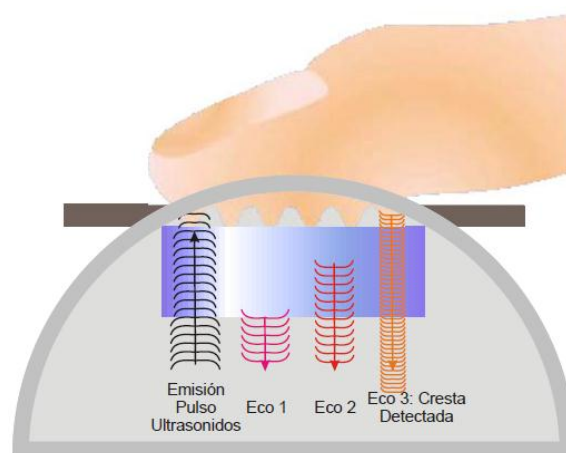


Figura 17. Sensor Ultrasónico

Esta técnica se muestra robusta frente a la suciedad y grasas acumuladas en el dedo, además de obtener imágenes de buena calidad. El inconveniente es que todavía es cara y no está desarrollada lo suficiente.

5.4.3.2 Estado Sólido

También conocidos como sensores de silicio, surgieron para abaratar los dispositivos y reducir el tamaño de los mismos. Todos los sensores basados en silicio constan de una matriz de píxeles, siendo cada píxel un pequeño sensor.

Las principales tecnologías desarrolladas para la adquisición de la imagen digital son: Campo Eléctrico, Piezoeléctrico, Capacitivo y Térmico.

Campo Eléctrico

Consideran la carga con una onda de radio de baja intensidad en el dedo como un transmisor, y las variaciones entre valles y crestas como una antena de array

debidamente sintonizada. Para conseguirlo, el sensor consta de un anillo conductor que genera una señal sinusoidal y una matriz de antenas activas que reciben la señal generada por el anillo modulada por la morfología de la piel. Es precisamente la dependencia de las propiedades fisiológicas de la piel lo que le hace ser un sensor difícil de engañar con dedos artificiales.

Sin embargo, la necesidad del contacto directo entre el anillo generador y el dedo puede causar rechazo del usuario por la alta temperatura que puede alcanzar la superficie de contacto.

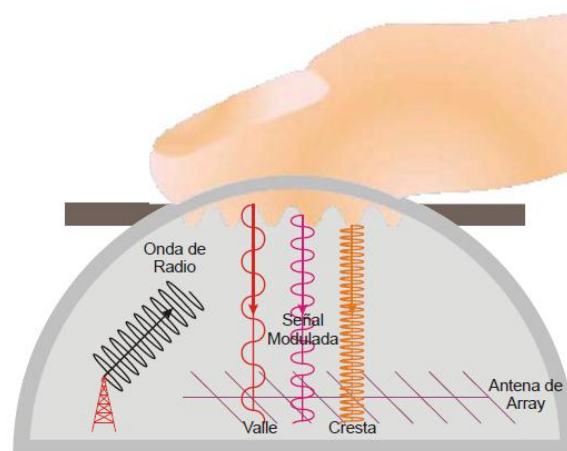


Figura 18. Sensor de Campo Eléctrico

Presión o Piezoeléctrico

Los sensores piezoeléctricos han sido diseñados para generar una señal eléctrica cuando son sometidos a una presión, esto es el denominado efecto piezoeléctrico. De tal forma que a más presión mayor corriente se genera. Una vez más, la diferencia de distancias existentes entre las crestas y los valles con respecto a la superficie del sensor, se traducen en una diferencia de presión y por tanto en una diferencia de corriente.

Desafortunadamente, estos sensores no son lo suficientemente sensibles como para detectar diferencias de presión tan pequeñas y se pueden falsear fácilmente.

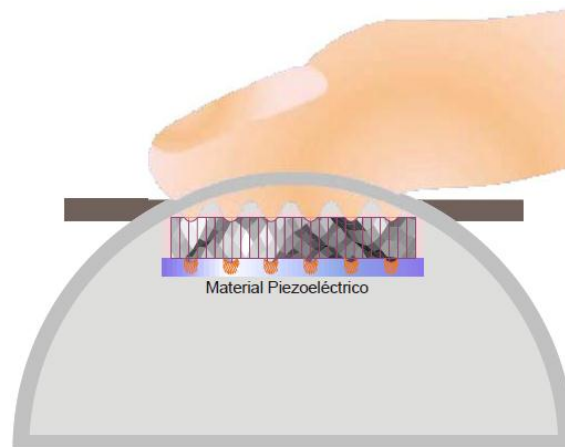


Figura 19. Sensor de Presión

Capacitivos

Es una de las tecnologías más usada de entre los sensores de silicio. El sensor formado por un array bidimensional de píxeles sensibles a la carga electrostática, se puede considerar como una de las pletinas del condensador, mientras que la otra pletina la constituiría el dedo, creándose pequeñas cargas eléctricas entre las dos pletinas. Las variaciones en el dieléctrico entre una cresta (formada principalmente por agua) y un valle (compuesto por aire) causan una variación capacitiva local. Esto permite que las crestas y los valles sean identificados, y la imagen sea construida.

En ocasiones los dedos demasiado húmedos, por el sudor o incluso demasiado secos, dificultan la adquisición de la huella dactilar, una ventaja de los sensores capacitivos, es que permite ajustar parámetros para mejorar la lectura en estas condiciones; desafortunadamente también tiene inconvenientes, como la necesidad de limpieza frecuente para evitar grasas o suciedad que perjudique la calidad de la imagen, o la posibilidad de dañar el dispositivo con descargas electrostáticas residuales generadas por el dedo.

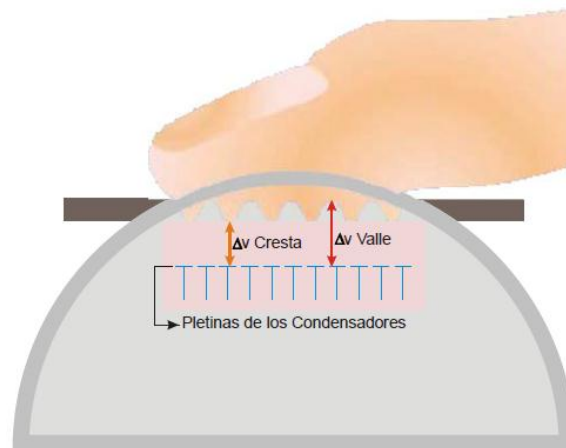


Figura 20. Sensor Capacitivo

Térmicos

Un material piroeléctrico es aquel capaz de convertir una diferencia de temperatura en una tensión. Un sensor de huella dactilar basado en este material, mide la diferencia de temperatura entre los sensores (píxeles) que están en contacto con las crestas y los que están bajo los valles que no están en contacto directo.

El enfoque térmico no se ve afectado por condiciones ambientales extremas, es robusto frente a descargas electrostáticas y ante el fraude con dedos artificiales. Sin embargo, al alcanzarse rápidamente el equilibrio térmico, la diferencia de temperatura inicial que generaba la imagen desaparece y así mismo la imagen. Esto hace que esta técnica se emplee principalmente en los sensores de huella dactilar por desplazamiento, pues al ir desplazando el dedo por la superficie del sensor se crea una ruptura constante del equilibrio térmico.

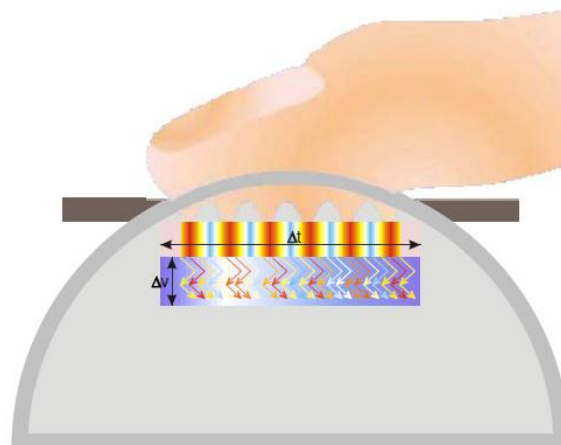


Figura 21. Sensor Térmico

5.4.3.3 Sin Contactos

Cuando un dedo toca o se desplaza sobre una superficie, la piel se deforma. La presión ejercida, el estado de la piel y la proyección de una superficie tridimensional irregular (dedo) sobre un plano bidimensional, introducen distorsión, ruido e inconsistencias en la huella capturada. Para tratar de solucionar estos problemas está surgiendo un nuevo enfoque en lo referente a tecnologías de captura de huella dactilar, los sistemas de huella dactilar Sin Contactos o Touchless. Debido a la falta de contacto entre el dedo y una superficie rígida, no produce ningún tipo de deformación en la piel durante la captura.

Los enfoques utilizados en la captura de huellas digitales se pueden agrupar en dos familias: Imágenes basadas en la Reflexión Sin Contactos (RTFI, Reflection-based Touchless Finger Imaging) y las Imágenes Basadas en la Transmisión Sin Contactos (TTFI, Transmission-based Touchless Fingerprint Imaging).

RTFI

Se emite luz monocromática sobre el dedo y la que es reflejada se captura a través de la cámara CCD o CMOS.

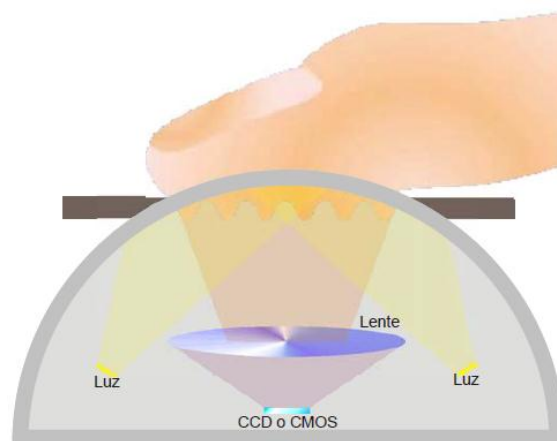


Figura 22. Sensor RTFI

TTFI

La luz que atraviesa el dedo, normalmente luz natural o ambiente, es capturada en la cámara CCD o CMOS.

Hay que decir que en cualquiera de los dos casos, la imagen resultante es de menor contraste que las obtenidas mediante la tecnología FTIR, lo que es importante para una buena extracción de minucias y de esta forma, lo que parecía ser una ventaja al evitar la deformación de las huellas se convierte en un pequeño inconveniente. Además, si la superficie del dedo no es iluminado perpendicularmente se producen sombras en los valles debido a las crestas que se traducen en una mala representación de los detalles pequeños para lo que se debe recurrir a técnicas de iluminación más sofisticadas para evitar estos errores de representación y obtener imágenes más contrastadas, aumentando el tamaño del dispositivo y su coste.

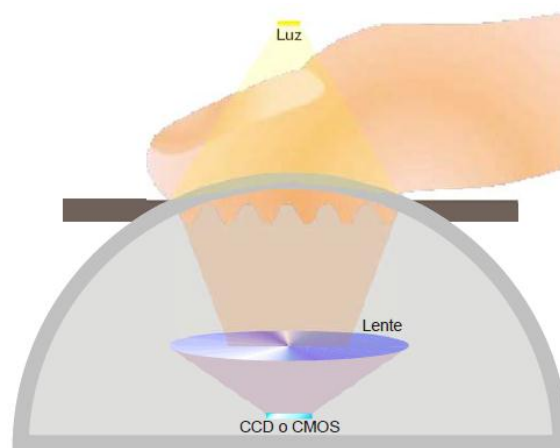


Figura 23. Sensor TTFI

Touchless 3D

Basadas en el enfoque Touchless, se toman muestra del dedo desde diferentes puntos de vista, por medio de un sistema multicámara o la combinación de cámara y espejos.

Esta nueva tecnología de muestreo representada en la Figura 24, resuelve algunos de los problemas asociados a los sensores de contacto como son los debidos a una mala posición del dedo, deformación de la piel, suciedad o huellas latentes, además también aborda algunas de las debilidades de los Touchless vistos anteriormente.

Sin embargo, esta tecnología presenta nuevos desafíos. Por ejemplo, la compatibilidad entre las imágenes 3D obtenidas, pues proporcionan un nuevo patrón de minucias, y las 2D disponibles actualmente.

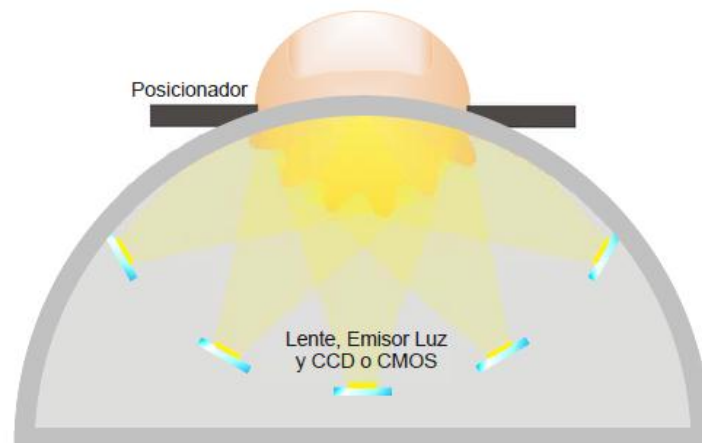


Figura 24. Sensor Touchless

5.5. Clasificación de las huellas dactilares

Una primera forma de clasificar una huella dactilar puede ser fijándonos en el patrón que dibujan sus crestas y valles. Estas estructuras son conocidas como lazo, delta y espiral. En total, según la distribución de dichas estructuras se definen cinco clases de huellas: lazo izquierdo, lazo derecho, espiral, arco y arco tensado.[36]



Figura 25. Tipos de huellas en función de su patrón de crestas y valles.

Otra parte importante en el reconocimiento de huellas suele ser la localización del núcleo y la delta. El núcleo es “el punto que se encuentra más al norte de la cresta más interna de la huella”. En la práctica puede ser interpretado como el punto central de la singularidad de lazo situada más al norte. En el caso de que no existan singularidades de lazo, como en las huellas de tipo arco, el núcleo será el punto de mayor curvatura de las crestas. La delta se corresponde con una estructura de tipo triangular, formada por tres orientaciones de crestas que divergen en un punto. Se produce por la intersección de las tres zonas de la huella dactilar: la zona basilar, la zona nuclear y la zona marginal.

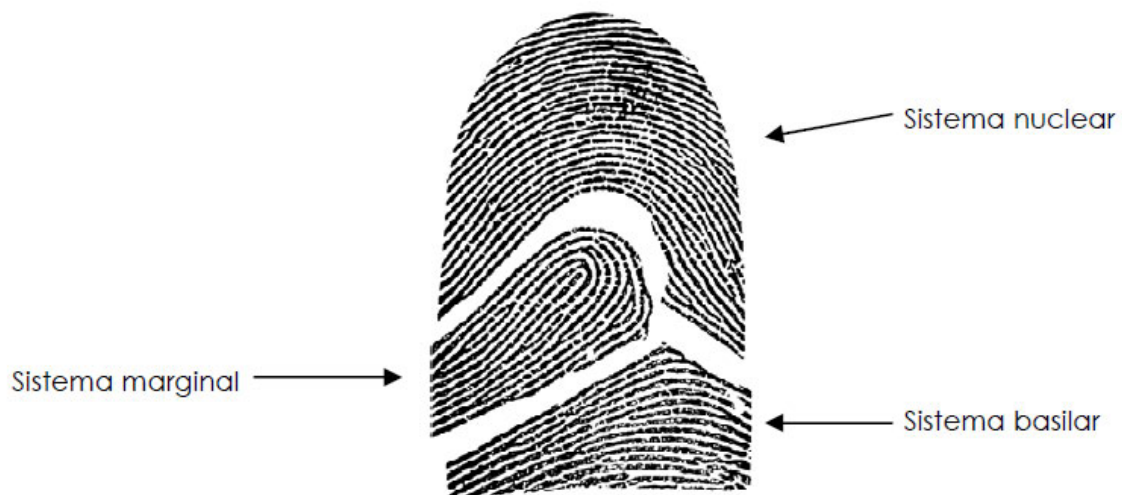


Figura 26. Los sistemas papilares

Pero no todas las huellas tienen una estructura bien definida y se pueden clasificar, por tanto, dentro de alguna de las clases expuestas. Esto se debe a que existen huellas con un aspecto intermedio entre dos o más tipos. En consecuencia, se podrán clasificar las huellas de un modo aproximado y nunca sistemático.

Por último, existe un tipo de singularidades locales en las huellas denominadas minucias (*minutiae*, en inglés). Una minucia, como ya se ha dicho anteriormente, es una anomalía en el normal fluir de una cresta. Estas irregularidades presentan una gran variedad entre distintos usuarios, siendo tal que el sistema judicial español fija en doce el número de minucias que deben coincidir en tipo, posición y ángulo para asegurar que dos huellas pertenezcan inequívocamente a la misma persona. Existen cientos de tipos de minucias, aunque todos ellos se pueden resumir en dos: bifurcaciones y terminaciones. Cada minucia se caracteriza por su coordenadas x e y , su ángulo θ que forma la recta tangente a la cresta con el eje horizontal y en ocasiones, un parámetro Q que indica la calidad de la minucia.

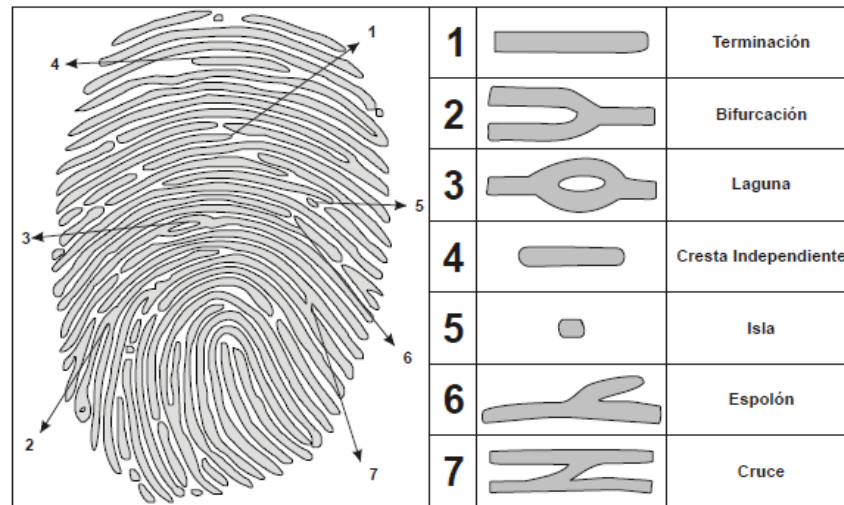


Figura 27. Minucias propias de una huella dactilar

5.6. Extracción de características

Uno de los puntos claves en cualquier proceso de reconocimiento es el correcto tratamiento de la información biométrica, para poder extraer las características que nos permitirán modelar y comparar con el resto de plantillas biométricas con el fin de reconocer al individuo.

5.6.1. Obtención de la orientación local y frecuencia de las crestas

La orientación local de las crestas es el ángulo que forman con el eje horizontal. El método aparentemente más sencillo de calcular su orientación es mediante el gradiente. Para ello se debe realizar una convolución de la imagen con la máscara de operador gradiente. El mayor inconveniente de esta técnica es la discontinuidad del arco tangente y su sensibilidad frente al ruido.

Se han propuesto técnicas más robustas empleando medias locales de gradientes y estimaciones del gradiente. La imagen de orientación local se obtiene representando la orientación dominante de las crestas en una matriz de bloques cuyo tamaño se corresponde al de la máscara utilizada para determinar el gradiente o su equivalente.[37]

La frecuencia de las crestas es la inversa del número de crestas que cortan un segmento de una unidad de longitud perpendicular a su dirección. Para su determinación hay diversos métodos: contar el número de píxeles de cada intensidad de gris entre las crestas; modelado de las crestas como un patrón sinusoidal o empleando la transformada de Fourier por bloques.

5.6.2. Segmentación

La segmentación en una huella dactilar, consiste en separar el área que contiene información de la huella del fondo de la imagen. No se suelen emplear técnicas que dependan de la intensidad de los píxeles, pues el fondo suele ser ruidoso, sino que se busca separar zonas con regiones estriadas (crestas y valles) de zonas sin variaciones predominantes, isotrópicas.



Figura 28. Segmentación de la zona de interés de una huella dactilar.

5.6.3. Detección de singularidades

La mayoría de los métodos para detectar singularidades (núcleos y deltas) emplean la imagen resultante de calcular la orientación local de las crestas. El índice de Poincaré es el método más empleado, definiéndose caminos cerrados por una secuencia de bloques de la imagen de orientación.

El índice de Poincaré $PG,C(i,j)$ se calcula sumando las diferencias de orientación entre elementos adyacentes del camino. Como no se conoce el sentido, sólo la dirección, se asigna uno aleatoriamente al primer bloque y a los siguientes se les asigna aquel que sea más parecido al anterior.

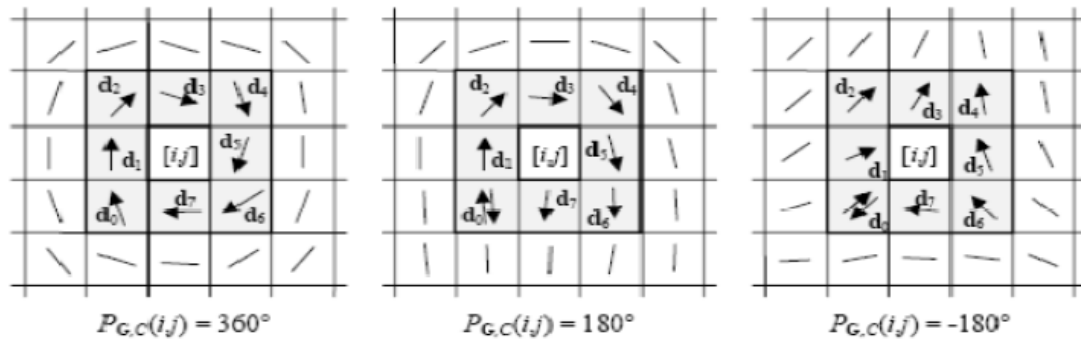


Figura 29. Ejemplos de cálculo del índice de Poincaré.

5.6.4. Mejora y binarización

La mejora de las imágenes obtenidas mediante los sensores pretende aumentar el contraste entre crestas y valles a fin de facilitar la extracción de minucias y descartar zonas demasiado ruidosas o de baja calidad.

Las técnicas clásicas para esta tarea no son suficientes para lograr resultados satisfactorios con huellas dactilares. Por eso se emplean filtros contextuales, es decir, en vez de emplear un único filtro para toda la imagen se emplea un filtro diferente en función de la zona que se esté filtrando.

Estos filtros que se emplean tienen una estructura sinusoidal con diferentes frecuencias y orientaciones. Una clase de filtros muy extendida en el ámbito de la mejora de las huellas dactilares son los filtros de Gabor [38].



Figura 30. Binarización de una huella.

Una vez mejorada la imagen, se puede binarizar, es decir, convertir sus píxeles en blanco o negro puro exclusivamente, estableciendo un umbral de binarización.

Muchos de los algoritmos utilizados para la mejora de las imágenes producen la imagen ya binarizada.

5.6.5. Extracción de minucias

Los métodos de extracción de minucias suelen requerir una imagen de la huella dactilar ya binarizada. Es frecuente realizar un proceso de afinado de las crestas para reducir su grosor hasta un píxel de tal modo que se facilite su procesado.

Posteriormente, las minucias se extraen seleccionando todos los puntos en los que se produce una terminación o bifurcación de una cresta.

Algunos autores han propuesto no utilizar binarización ya que es posible que se pierda una gran cantidad de información en ese proceso. La binarización es además un proceso complejo y lento que puede introducir minucias no existentes. Si la imagen de la huella no es de suficiente calidad, la binarización arrojará resultados desastrosos.



Figura 31. Extracción de minucias; bifurcaciones (cuadrados) y fin de crestas (círculos)

En general suele existir una etapa de post-procesado para eliminar minucias espurias, resultado de las fases anteriores de mejora y binarización. En esta etapa de

procesado se pueden eliminar minucias que se hayan localizado en zonas de baja calidad o minucias que se encuentren demasiado próximas.

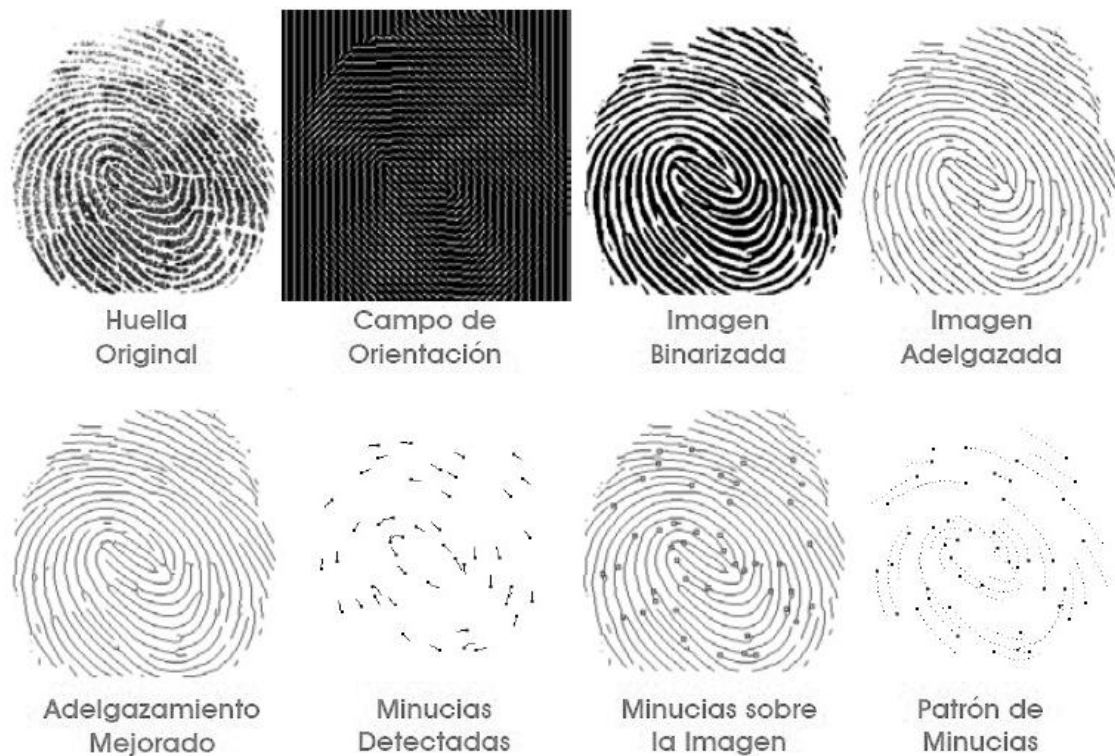


Figura 32. Secuencia de extracción de minucias.

5.7. Comparación de huellas

La comparación o matching de huellas es una de las fases más críticas en un sistema de verificación de huella dactilar. Comparar dos huellas puede ser un proceso muy complejo ya que en general las dos huellas a comparar habrán sufrido desplazamientos, rotaciones, distorsiones o quizá su calidad pueda ser baja. Por lo tanto, un buen algoritmo de comparación deberá ser robusto frente a la variabilidad en las huellas a comparar.[39]

Las principales dificultades ante las que debe actuar un algoritmo de comparación son las siguientes:

- Desplazamiento y rotación: son el resultado de que el usuario sitúe su dedo en un lugar diferente del sensor en cada ocasión. Pueden ocasionar que una parte de la huella se encuentre fuera del área de

captura, por lo que las huellas a comparar tendrán un área menor en común a la real. Este problema afecta en gran medida a los sensores con una reducida área de captura.

- Distorsión no lineal: es la consecuencia de plasmar en una imagen de dos dimensiones una huella dactilar de 3 dimensiones, con una elasticidad que provoca deformaciones no lineales en su superficie.
- Diferencias de presión y de las condiciones de la piel: la presión que se ejerza contra el sensor y la humedad o sequedad de la piel hacen que la captura sea diferente en cada situación. También afectan sustancias corporales como el sudor o la grasa.
- Errores en la extracción de características: los algoritmos de extracción de minucias tienden a producir minucias espurias en las huellas de baja calidad que enmascaran a menudo minucias reales.



Figura 33. Dos realizaciones de la misma huella en instantes diferentes.

En la Figura 33 se observan dos impresiones de la misma huella de un usuario tomadas en condiciones diferentes procedentes de la base de datos.

Existen en la literatura científica un gran número de algoritmos automáticos de comparación o matching para huellas dactilares. La mayor parte de ellos presentan un buen rendimiento cuando las huellas dactilares que se les presentan son de buena calidad, sin embargo, conseguir discernir entre huellas de baja calidad o entre huellas dactilares incompletas sigue siendo un reto de interés científico. Una muestra clara de ello son las competiciones internacionales celebradas periódicamente con el fin de evaluar el rendimiento de los sistemas que son propuestos en la actualidad, como las competiciones FVC (Fingerprint Verification Competition). Los algoritmos de

reconocimiento desarrollados hasta la fecha pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- Basados en correlación, normalmente a nivel de bloque: las imágenes del par de huellas a comparar se superponen y se calcula la correlación entre píxeles equivalentes para diferentes alineaciones (variaciones en la posición y el ángulo).
- Basados en minucias: se trata de la técnica más extendida al sustentar la comparación manual de huellas por parte de los expertos forenses en la materia. Las minucias se extraen de ambas huellas y se almacenan en vectores como conjuntos de puntos en el plano bidimensional de la imagen. Estos algoritmos tratan de hallar la alineación óptima para conseguir el mayor número posible de coincidencias entre pares de minucias de la huella de referencia y la huella a comparar.
- Basados en características del patrón de crestas o en texturas: en imágenes de baja calidad la extracción de las minucias es bastante complicada y poco fiable mientras que otras características (orientación local, forma de las crestas, información de las texturas), en general menos distintivas, pueden obtenerse de manera más robusta. Los algoritmos pertenecientes a esta familia comparan las huellas en términos de las características antes mencionadas extraídas del patrón de crestas.

Existen además otras aproximaciones al problema basadas en redes neuronales o aquellas que utilizan procesadores en paralelo o algún tipo de arquitectura dedicada.

5.7.1. Técnicas basadas en correlación

Esta clase de métodos se basa en el cálculo de la correlación cruzada entre la imagen de muestra y la de entrada tratando de maximizarla. Cuanto mayor sea la correlación mayor será la similitud entre las huellas a comparar y su maximización permitirá calcular el valor del desplazamiento y la rotación que hacen que las dos imágenes sean lo más parecidas posibles.



Figura 34. Correlación local entre huellas.

A pesar de su aparente simplicidad este algoritmo tiene un coste computacional muy elevado y es vulnerable a distorsiones no lineales en la imagen de la huella, muy frecuentes dada la elasticidad de la piel. Tomemos como ejemplo una imagen de 400×400 píxeles. Si se contemplan desplazamientos en el eje vertical y horizontal de ± 200 píxeles y se miden rotaciones en un margen de $\pm 30^\circ$ con paso de 1° , sería necesario realizar $401 \times 401 \times 61$ correlaciones cruzadas, dando lugar a aproximadamente 1.569.000.000 operaciones.

Se han desarrollado algoritmos que consiguen disminuir considerablemente el coste computacional mediante el cálculo de la correlación de forma local en lugares estratégicos de la huella (en el núcleo o cerca de minucias de buena calidad), en vez de globalmente. De todas formas ninguno de estos métodos asegura una mejora drástica de los resultados proporcionados por el método general.

Los algoritmos de correlación por bloques son interesantes en la actualidad al reducir el coste computacional necesario con respecto a la correlación global.

5.7.2. Técnicas basadas en minucias

Los métodos basados en minucias son los más conocidos y de uso más extendido en la actualidad. Están basados directamente en la forma en que los expertos forenses realizan la comparación entre huellas.

A diferencia de las técnicas basadas en correlación, donde la representación de la huella coincide con la imagen de la misma, en este caso la representación es un vector de características de longitud variable cuyos elementos son las minucias de la huella. Cada minucia se puede describir a partir de un número de atributos como su

posición en la imagen, su orientación, tipo (final de cresta o bifurcación de cresta), un peso basado en la calidad de la imagen en su vecindad, etc.

Dos minucias se consideran correspondientes si la distancia euclídea de y la diferencia en sus direcciones son menores a una cierta tolerancia.

Las tolerancias compensan las posibles deformaciones entre las huellas a comparar y los posibles errores a nivel de píxel en los algoritmos de extracción de minucias.

Por consiguiente, la alineación previa de las huellas es absolutamente necesaria para poder realizar las comparaciones hasta ahora presentadas. Será necesario desplazar y rotar una de las dos imágenes e incluso realizar algunas transformaciones no lineales para que las minucias correspondientes se encuentren lo más próximas posible.

Para realizar una alineación correcta se debe efectuar una exploración de posición (desplazar una huella sobre la otra en pasos verticales y horizontales de un determinado tamaño) y de rotación (girar una huella sobre otra hasta maximizar el número de correspondencias). Pueden considerarse otro tipo de transformaciones geométricas como el escalado o la aceptación de distorsiones no lineales, siempre teniendo en cuenta que cuantas más transformaciones se toleren más grados de libertad se están considerando y por tanto el cálculo de la alineación requerirá un mayor coste computacional.

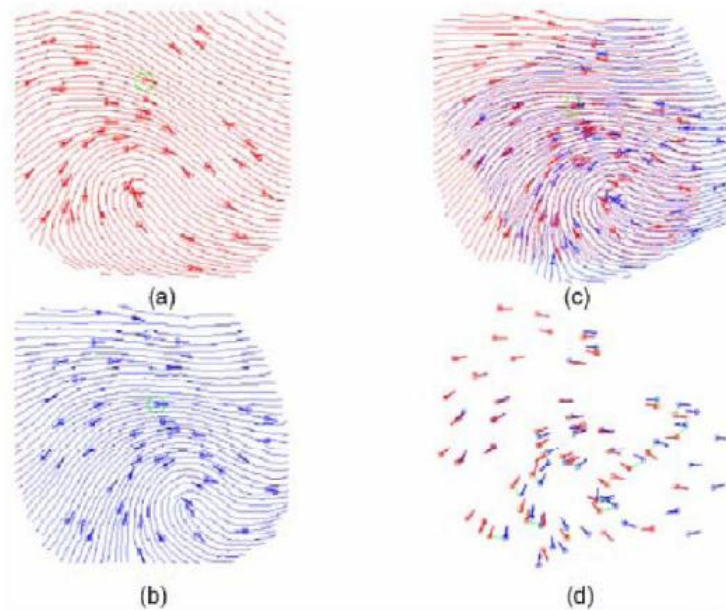


Figura 35. Comparación de huellas basada en minucias. (a) y (b) huellas a comparar, (c) alineación entre huellas y (d) detección de minucias coincidentes.

Realizar la alineación de las huellas dentro del propio algoritmo de matching da lugar a algoritmos muy robustos pero de mucho gasto computacional y en consecuencia, bastante lentos. Se han documentado técnicas que aceleran el proceso realizando una prealineación y guardando en las bases de datos sólo huellas dactilares ya alineadas, de forma que el algoritmo de matching únicamente tiene que calcular el número de minucias coincidentes. Existen dos aproximaciones básicas al problema de prealineación:

- Absoluto: cada huella dactilar es prealineada, de forma independiente al resto, antes de ser almacenada en la base de datos. La técnica de prealineación más extendida es la que reubica la imagen en función del núcleo de la huella, aunque no es del todo fiable puesto que la detección del núcleo de la huella con nivel excesivo de ruido o con patrones tipo arco es complicado y poco preciso. El prealineación en cuanto al ángulo es aún más complejo y aún no se ha logrado una manera fiable de conseguirlo. La huella de entrada sólo será alineada una vez y puede ser comparada con las huellas de la base de datos directamente al encontrarse éstas ya prealineadas.

- Relativo: la huella de entrada se prealinea con respecto a cada una de las huellas de la muestra con las que va a ser comparada. Consigue una mayor velocidad que los algoritmos de matching que no realizan ningún tipo de prealineación, (ya que éstos deberán realizar la alineación), aunque su eficiencia es sensiblemente menor que la del prealineación absoluto. En cuanto a su precisión es mayor que la del método absoluto pero inferior a las de las técnicas con la alineación incluida en el algoritmo de matching.

La alineación de las huellas conlleva gran consumo de recursos. En consecuencia, varios autores han propuesto métodos locales de matching de minucias. Estas técnicas consisten en comparar las huellas dactilares de acuerdo a estructuras locales de minucias; las estructuras locales están caracterizadas por atributos invariables con respecto a transformaciones globales (traslación, rotación...) y por tanto, sirven para realizar la correspondencia entre huellas sin necesidad de prealineación. Los algoritmos locales relajan las dependencias espaciales y por tanto reducen la información disponible para discriminar entre las huellas, lo que resulta de menor precisión que aquellos que operan con características globales.

En general a la hora de diseñar un algoritmo hay que alcanzar un compromiso entre la utilización de características globales (mayor complejidad pero mayor poder discriminativo) y el uso de características locales (mayor simplicidad y velocidad pero menor capacidad de diferenciación entre huellas)

5.7.3. Técnicas basadas en patrones de crestas o texturas

A pesar de que las técnicas basadas en minucias están hoy en día muy extendidas, se han buscado otros métodos eficientes para comparar huellas sin emplear minucias.

Los motivos de esta proliferación son:

- 1) Es complicado extraer de forma fiable las minucias de una huella de baja calidad.
- 2) El tiempo de extracción de minucias es alto y requiere una capacidad de computación moderadamente elevada.

- 3) Pueden conseguirse características que utilizadas junto con las minucias mejoren las prestaciones de las técnicas basadas exclusivamente en dichas minucias.

Los rasgos alternativos a las minucias comúnmente utilizados son:

- Tamaño de la huella y forma de la silueta externa de la misma (en general muy inestable)
- Número, tipo y posición de las singularidades (poco fiable)
- Relación espacial y atributos geométricos de las líneas de crestas.
- Características relativas a la forma.
- Poros de la piel. Poseen un alto grado discriminativo pero su detección requiere sensores de alta resolución con elevado coste.
- Información de texturas global y local. Esta es una alternativa importante a los métodos basados en minucias y en estado de investigación. Las texturas se definen por la repetición espacial de elementos básicos, y se caracterizan por propiedades como la escala, orientación, frecuencia, simetría, etc.
- Las líneas de crestas quedan caracterizadas por su orientación y frecuencia excepto en las regiones singulares, que son discontinuidades en un patrón regular básico e incluyen bucles y deltas a un nivel de resolución bajo y las minucias en una resolución alta.

5.7.4. Influencia de la calidad en el rendimiento de las técnicas de matching

Un factor determinante en la comparación de dos o más huellas es la calidad de las imágenes tras su captura. Existen diversos métodos para caracterizar la calidad de una imagen de huella dactilar. Estos métodos adoptan tres enfoques diferentes: unos utilizan características globales de la imagen, otros características locales y por último, los basados en clasificadores, que determinan la calidad de una imagen en función de la separación y las distribuciones de puntuaciones de usuario e impostor para cada huella.[41]

Se ha comprobado que las técnicas de comparación basadas en texturas son en general más robustas en los casos en los que la calidad de la huella de la base de

datos o la huella a comparar sean bajas. En cambio, las técnicas basadas en minucias suelen tener un rendimiento mejor en casos de alta calidad. Por lo tanto, una posible solución es la de emplear sistemas de identificación que utilicen diferentes técnicas de comparación y combinar sus puntuaciones de salida.



6 RECONOCIMIENTO FACIAL



6.1. Introducción

El rostro humano es una de las principales señas de identidad para el reconocimiento de cada individuo, debido a su facultad discriminativa. Los grandes avances en las capacidades de computación que se han producido en las últimas décadas, han posibilitado reconocimientos similares en forma automática. Los algoritmos de reconocimiento facial anteriores usaban modelos geométricos simples, pero el proceso de reconocimiento actualmente ha madurado en una ciencia de sofisticados algoritmos matemáticos. Importantes avances e iniciativas en los pasados diez o veinte años han colocado a la tecnología de reconocimiento facial al centro de la atención. Sin embargo, se pueden destacar algunas de las dificultades existentes en este campo como pose, expresión facial o iluminación.

Los sistemas de reconocimiento facial tienen dos modos de funcionamiento posibles: verificación o identificación. En el modo de verificación (1:1) dos imágenes de caras son analizadas en base a la semejanza entre los rasgos. La decisión se toma a partir de las coincidencias encontradas. Sin embargo, en el modo de identificación (1:N) se compara la imagen de una sola cara contra un conjunto de N caras. Cualquiera de los dos modos de funcionamiento del reconocimiento facial automático funciona sin la interacción humana.[42]

6.2. Historia

El primer intento de identificar a un sujeto comparando su rostro con un pequeño conjunto de imágenes data del año 1871 usado en el tribunal británico. Y el primer método sistemático de reconocimiento fue desarrollado por el criminólogo francés Alphonse Bertillon en el año 1882, mediante la toma sistemática de medidas y la creación de una base de datos de los rasgos faciales. El método seguido por Bertillon consistía en identificación, toma de medidas y clasificación de todos los rasgos posibles.



Figura 36. Alphonse Bertillon realizando medidas

El primer artículo científico sobre el reconocimiento facial automático apareció en 1966 publicado por Bledsoe. En el proyecto desarrollado se trabajaba con unas imágenes de la cara en las cuales, se calculaba una lista de veinte distancias entre los puntos característicos del rostro. Entre los puntos característicos se pueden mencionar las pupilas, las esquinas de la boca, ojos, cejas, etc. Basándose en las diferencias y similitudes entre estas 20 distancias se conseguía identificar dos caras iguales. Poco a poco la lista de los puntos característicos fue aumentando para mejorar el resultado de la identificación forense y se calculó que era necesario obtener 6 características diferentes para una base de datos de 255 imágenes y 14 para una base de datos de 4.000.000 imágenes.

El primer sistema completamente automático fue desarrollado por Kanade usando una lista de las características faciales sacadas de las imágenes en escala de grises. Para dichas fotos se calculaban los histogramas locales para conseguir la identificación de la persona. El sistema de Kanade utilizando 20 imágenes obtenía una precisión de 75% por lo que se necesitaba un sistema más preciso.[43]

Por primera vez el análisis de componentes principales (Principal Component Analysis, PCA) fue utilizado para las imágenes de rostros por Sirovich en el año 1987 para conseguir la compresión de las fotos y posteriormente por Turk y Pentland para la identificación utilizando el conjunto de Eigenfaces . Esta técnica permite trabajar con un conjunto extenso de datos haciendo posible la reducción de la dimensionalidad de dicho conjunto. El método PCA se basa en la construcción de una transformación

lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es representada en el primer eje (primer componente principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Intuitivamente la técnica sirve para hallar las causas de la variabilidad de un conjunto de datos y ordenarlas por importancia quedándose siempre con los que más relevancia tengan.

Otro de los métodos más extendidos en el área del reconocimiento facial es el análisis discriminante lineal (Linear Discriminant Analysis, LDA) que se basa en el análisis lineal de Fisher. Dicho método intenta buscar una combinación lineal de características significativas de un conjunto dado. La combinación resultante podría servir de clasificador o reductor de dimensionalidad del conjunto a analizar. A diferencia de PCA, en LDA la importancia se da a las diferencias de clases en vez de a las similitudes, por lo que se logran mejores resultados usando este método.

Correspondencia entre agrupaciones de grafos elásticos (Elastic Bunch Graph Matching, EBGM) es otro de los métodos que se utiliza. La técnica se basa en la búsqueda de algunos de los puntos más característicos de la cara que permitan la creación de un grafo representativo. La creación de los grafos se puede dividir en dos etapas principales: la estructura geométrica, es decir el conjunto de nodos y aristas y las etiquetas cualitativas como los jets y distancias. El primer paso consiste en la normalización de las imágenes y se realizan algunas transformaciones geométricas con el objetivo de ubicar las coordenadas de los ojos en unas posiciones determinadas.

Y en la segunda etapa se consiguen los valores de los jets y las distancias utilizando el método de Wavelets de Gabor, dado que son funciones aproximadamente paso-banda que pueden diseñarse como un banco de filtros con diferentes dilataciones y rotaciones. La principal ventaja es que se obtienen los resultados tanto en el dominio espacial como frecuencial, ya que los jets de un grafo representan un conjunto de coeficientes de la convolución de los núcleos con diferentes rotaciones y frecuencias de un pixel de una imagen.[44]

6.3. Problemática del reconocimiento facial automático

La mayoría de los trabajos realizados para resolver el reto del reconocimiento facial automático se han planteado como un problema de reconocimiento de patrones a partir de imágenes bidimensionales de intensidades. Ello conlleva que se produzcan errores debidos fundamentalmente al cambio de aspecto que pueden presentar las caras de unas capturas a otras a causa de rotaciones, de las variaciones de escala, y de los cambios de intensidad de los píxeles (debidos a la presencia de sombras dependientes de la posición del objeto respecto a la fuente de luz así como al tipo de iluminación que recibe la escena). Además, se pierde gran cantidad de información discriminante de la cara cuando ésta se proyecta en un espacio bidimensional.

Estos inconvenientes afectan negativamente a numerosas técnicas aportadas para resolver el problema de reconocimiento facial automático 2D, como las basadas en extracción de características geométricas locales (distancias, ángulos, áreas, etc.), obtenidas a partir de segmentos entre puntos de la cara calculados mediante técnicas de procesamiento de imágenes bidimensionales. La extracción de este tipo de características de los rostros, exige en primer lugar una etapa previa de localización de la cara en la escena, tarea difícil cuando el fondo de la imagen contiene otros objetos. Por ello, estas aplicaciones requieren que el entorno de adquisición sea restringido. Además, debido a que estas características faciales se encuentran en las imágenes en zonas donde hay un gradiente de intensidad pronunciado, su visibilidad en las imágenes depende de la posición y del tipo de iluminación, lo que restringe las aplicaciones de estos sistemas a aquéllas en las que las condiciones de iluminación sean controladas.

Para evitar las complejas tareas de localización de la cara en la imagen y extracción automática de características se utilizan las técnicas holísticas. Que capturan y analizan la imagen bidimensional completa como patrón, incluido el fondo, evitándose así la detección de la cara en la imagen y la extracción de características. Entre estas técnicas destacan las basadas en el análisis de componentes principales, y los enfoques basados en redes neuronales. Aunque les afectan en menor medida los cambios de intensidad para reconocer una cara, son muy sensibles ante variaciones en la escala y el fondo de la imagen. Aunque producen excelentes

resultados cuando son aplicadas a datos adquiridos de forma controlada, es necesaria la obtención de sistemas que relajen estas restricciones.[45]

Hoy en día, los investigadores trabajan en sistemas que eviten las restricciones de condiciones controladas en los algoritmos para adquirir robustez ante cambios de iluminación, edad, rotación, traslación, profundidad, expresiones faciales, oclusiones, pelo, gafas, maquillaje, etc. El diseño de algoritmos efectivos ante estos cambios está en fase de investigación.

La próxima generación de sistemas de reconocimiento facial requerirá el reconocimiento de personas en tiempo real y en situaciones menos controladas. La tecnología utilizada en los ambientes inteligentes ha de ser no intrusiva, permitiendo a los usuarios que actúen libremente, sin sentirse vigilados.

El empleo de información facial tridimensional permite mitigar el efecto negativo de algunos factores anteriormente descritos, como son la influencia de la iluminación, el maquillaje, las transformaciones geométricas (rotaciones, traslaciones y escalados), etc. Los avances en velocidad y capacidad de memoria de los computadores actuales, así como la disminución del coste y el tamaño de los digitalizadores 3D que proporcionan representaciones realistas de la superficie de los objetos captados, han favorecido que se haya empezado a abordar el problema de reconocimiento a partir de datos tridimensionales de los objetos, lo que aporta ventajas sobre el reconocimiento a partir de imágenes de intensidad bidimensionales. Los digitalizadores 3D proporcionan representaciones que contienen una gran densidad de puntos de la superficie muestreada, y a escala real.[46]

En los últimos años, se ha incrementado el consumo de un gran número de digitalizadores 3D no táctiles de uso comercial. Estos dispositivos, además de su versatilidad, son capaces de capturar imágenes de rango y texturas. El software adicional proporcionado con estos equipos permite la creación de mallas poligonales a varias resoluciones a partir de las nubes densas de puntos 3D, y el registro de varias vistas del objeto escaneado, así como otras funciones. El auge de las aplicaciones de modelado de objetos tridimensionales y la animación por computador, entre otras, han motivado el desarrollo y la proliferación de los digitalizadores 3D. Esto ha propiciado el abaratamiento del coste de este tipo de sensores, la reducción de su tamaño, su portabilidad, su facilidad de uso y el aumento de sus prestaciones.

La mayor parte de los trabajos científicos sobre Reconocimiento Facial Automático han aportado técnicas 2D (que utilizan imágenes bidimensionales de intensidad para el reconocimiento), siendo todavía muy pocos y recientes los trabajos de Reconocimiento Facial Automático que emplean técnicas de Visión Tridimensional. Además hasta hace muy poco no se contaba con Bases de Datos de imágenes faciales 3D. Las Bases de Datos de imágenes faciales 3D existentes actualmente o bien presentan muy pocas imágenes 3D de cada individuo o bien las variaciones en cuanto a deformaciones producidas por expresiones faciales entre dichas imágenes son muy leves. Por ello, y por la escasa proliferación de los digitalizadores 3D hasta hace pocos años, los Sistemas de Reconocimiento Facial Automático mediante técnicas de Visión Tridimensional existentes, se han evaluado sobre un escaso número de imágenes faciales 3D, y bajo condiciones de adquisición uniformes.

6.4. Los sistemas de reconocimiento facial automático: conceptos relacionados

Un sistema de reconocimiento facial automático realiza la siguiente función: dada una o varias imágenes (estáticas o en movimiento) de una cara desconocida, selecciona entre las caras registradas en su base de datos (de personas conocidas), aquella (o aquellas) con un mayor grado de similitud o parecido, devolviéndose la identidad de ésta. El sistema producirá un fallo en el reconocimiento cuando al presentar una entrada correspondiente a un individuo que se desea reconocer, da como resultado una identidad falsa. Si se desea otorgar al sistema capacidad para que si se le presenta una cara desconocida por él (no registrada), sea capaz de indicar que esa cara no es ninguna de las registradas, es posible establecer un umbral de decisión, de tal manera que si el grado de similitud es muy pequeño (p.e. si la distancia entre la cara a reconocer y la cara más parecida de la base de datos de caras supera dicho umbral), indicará que no es posible identificar a ese individuo, pues ese individuo no es conocido por el sistema.[47]

La solución del problema involucra, en general, las siguientes etapas que típicamente integran un sistema de visión artificial: adquisición de las imágenes, detección de la cara en la imagen, extracción de características y reconocimiento.

Para la creación de un sistema de reconocimiento es preciso realizar la adquisición de la base de datos de imágenes conocidas y aplicar sobre cada una de ellas off-line las mismas etapas de detección y extracción de características que las representan en el sistema, utilizadas para las comparaciones. La captura de las imágenes faciales puede realizarse bajo condiciones controladas, por ejemplo, fijando la posición de la cabeza del sujeto, la iluminación, etc..

La detección de caras en una escena cualquiera es un tema de investigación en sí mismo, independiente del reconocimiento facial automático, debido a que además de tener aplicación en este tema, tiene otras aplicaciones como en el seguimiento de caras en secuencias de vídeo, para inicializar el sistema, en la estimación de la pose, compresión, en recuperación de imágenes, en sistemas de interacción hombre-máquina o en el análisis de expresiones faciales.

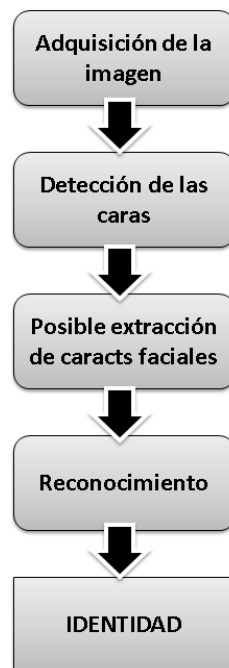


Figura 37. Configuración de un sistema de reconocimiento facial genérico

Por otra parte, la extracción de características, tiene también aplicación en el seguimiento de rasgos faciales, animación, análisis de expresiones faciales y de emociones y en sistemas HCI, de interacción hombre-máquina, entre otras. Sin embargo en muchas técnicas de reconocimiento facial automático se aborda la etapa de extracción de características, ya que las distintas técnicas propuestas aportan nuevas características para representar y posteriormente reconocer a las caras.

Por tanto, en los trabajos de reconocimiento facial automático, generalmente se aborda la metodología para su extracción y a continuación se experimenta y se ofrecen los resultados obtenidos en el reconocimiento. Existen otras técnicas llamadas holísticas, que permiten trabajar con la imagen facial completa como patrón.

Los parámetros de medida de la calidad de un sistema de reconocimiento son: la generalidad de las posibles imágenes de entrada, universo de entradas, la precisión o porcentaje de sujetos bien identificados, la robustez, frente a escala, orientación, oclusiones, iluminación, baja resolución, ruido en las imágenes, el tiempo de respuesta y el tiempo de entrenamiento. Es muy importante en este tipo de sistemas la velocidad, pues muchas aplicaciones requieren una ejecución en tiempo real. Los parámetros de medida del coste de un sistema de este tipo son: el coste global del sistema, el de los equipos que lo formen, el volumen de almacenamiento necesario y el tiempo de desarrollo de la aplicación.

6.5. Reconocimiento facial a partir imágenes de intensidad 2D

En esta sección se describen los antecedentes y el estado del arte correspondientes al reconocimiento facial automático 2D. Una vez detectada, localizada y segmentada la cara de imagen, las siguientes etapas son la obtención de una representación de la misma y su posterior reconocimiento. De manera general, las técnicas existentes según el tipo de características empleadas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Técnicas basadas en rasgos locales. Son las que utilizan características que describen la cara parcialmente. Como ejemplo, un sistema de este tipo podría consistir en extraer rasgos locales, por ejemplo, ojos, boca, nariz, etc. O bien líneas o puntos, a partir de los cuáles se calculan los valores de las características. Estas pueden consistir en distancias, áreas, ángulos, etc., y sirven para representar a la cara con vistas a la etapa de reconocimiento.
- Técnicas holísticas. Estas también se denominan métodos basados en la apariencia o métodos basados en imágenes. Utilizan características

de una imagen tales que la describen globalmente. Utilizan la imagen facial completa como patrón, incluido el fondo, aunque es deseable que este ocupe la menor superficie posible, y por tanto se evita la etapa de segmentación. Son métodos holísticos los que se basan en el análisis de componentes principales. En ellos se genera una representación de la imagen global de tamaño mucho menor que el de la imagen original). Además existen otros métodos, que emplean diferentes tipos de Redes Neuronales para clasificar información global (por ejemplo, imágenes directamente para efectuar el reconocimiento).

Existen múltiples técnicas derivadas de cada una de las mencionadas anteriormente, así como métodos híbridos que combinan ambas. Por ello, en cada una de las secciones, al introducir una técnica, se presentan además posibles derivaciones de ésta, y en ocasiones, métodos híbridos existentes que las combinen con otras.

6.5.1. Técnicas basadas en rasgos locales

Hasta los años 90 la mayoría de los sistemas de reconocimiento facial propuestos empleaban rasgos locales extraídos de las imágenes 2D de la cara, una vez localizada ésta en la imagen. Las técnicas holísticas aparecidas con posterioridad, no los han suplantado, sino que actualmente se siguen investigando ambas técnicas. En la década de los 80, el número de trabajos que se realizaron fue escaso debido al alto coste del hardware que se necesitaba para implementar aplicaciones en tiempo real. Se comenzó la investigación abordando el problema del reconocimiento a partir de imágenes faciales de perfil, experimentándose sobre un número pequeño de sujetos. [48]

En la década de los 90 se incrementó la investigación en este tema de forma vertiginosa, teniendo por objetivo obtener sistemas de reconocimiento facial completamente automáticos. Ello se debió a la gran cantidad de nuevas aplicaciones comerciales que potencialmente adquirieron los sistemas de identificación personal, así como a la reducción en aquellos años del coste del hardware necesario para el tratamiento de imágenes. Las primeras aplicaciones que se atribuían a estos sistemas eran las de identificación en las enormes bases de datos de imágenes faciales de las fuerzas de seguridad. Hasta mediados de los 90 la mayor parte de los trabajos,

utilizaban imágenes 2D estáticas. En dicha década se comenzó a abordar el problema de reconocimiento utilizando imágenes frontales de los individuos, mayoritariamente.

6.5.1.1 Extracción de rasgos locales

La extracción automática de rasgos locales, ojos, boca, etc., en general y de puntos faciales en particular tiene aplicaciones, no sólo en la obtención de características geométricas locales para reconocimiento facial, sino también en otras como el seguimiento de individuos en secuencias de vídeo, el análisis de expresiones faciales o el ajuste de puntos de control de un modelo 3D de una cabeza a una imagen para obtener un modelo particularizado de un individuo concreto. La extracción de rasgos no se realiza todavía con suficiente precisión. Por ejemplo, la mayoría de las técnicas de localización de los ojos asumen la existencia de determinados modelos geométricos o de textura, y no funcionan cuando el ojo está cerrado.

Cuando la extracción de rasgos es una etapa previa para efectuar un posterior reconocimiento facial, la precisión en el reconocimiento depende en buena medida de la exactitud empleada en la etapa de extracción de los rasgos. Por otra parte, un factor por el que esta tarea resulta relevante en reconocimiento facial automático, es que los métodos holísticos basados en eigenfaces y fisherfaces, de los que se hablará más adelante, son muy sensibles a variaciones de escala, por lo que necesitarán una etapa de localización de rasgos precisa si se desea una correcta normalización en cuanto a escala de la cara detectada. Además, la localización de rasgos faciales es crucial en el análisis de expresiones faciales de forma completamente automática, donde es preciso disponer de métodos de extracción de rasgos más robustos, en entornos menos controlados, pues la mayoría de estos sistemas requieren intervención manual en la inicialización.

Los métodos más importantes de extracción de rasgos faciales de imágenes 2D son:

- Los métodos genéricos de procesamiento de imágenes, que realizan búsqueda de bordes, líneas, curvas, etc.
- Los métodos basados en el uso de plantillas de los rasgos para localizarlos.
- Métodos de correspondencia estructural, que consideran las restricciones geométricas existentes entre los rasgos.

Los dos primeros realizan la búsqueda de los distintos rasgos de forma aislada, por tanto, tienen la desventaja de que cuando la apariencia del rasgo cambia por ejemplo, cuando un ojo está cerrado, hay gafas, o la boca está abierta, tienen dificultades. Los del tercer tipo, más recientes, basados en métodos de correspondencia estructural, han demostrado proporcionar mejores resultados.

6.5.1.2 Técnicas de procesamiento de imágenes.

Existen numerosas publicaciones en las que para extraer rasgos locales, puntos, líneas del borde de la cara, ojos, etc. se han utilizado técnicas típicas de procesamiento de imágenes como umbralización de la intensidad de los píxeles, detección de bordes, máximos de curvatura local de bordes, detección de esquinas, análisis del histograma de intensidad, variaciones en la resolución, etc. Además se han propuesto técnicas encaminadas al procesamiento de imágenes de caras:

- Métodos basados en el uso plantillas fijas. Estos métodos consisten en comparar cada región de la imagen con una plantilla de tamaño fijo que contiene únicamente un patrón semejante al rasgo que se desea localizar. Dicha plantilla puede consistir en una imagen del rasgo que se compara con todas las partes de la imagen, para obtener aquella de máxima correlación. Este método es muy dependiente de las condiciones de iluminación y tiene un alto coste computacional. La plantilla también puede consistir en un modelo sintético de la forma del rasgo a localizar, por ejemplo, puede estar definida por las líneas que forman su contorno (modelo 2D), para ser comparada con la imagen de bordes.
- Métodos basados en el uso de plantillas deformables. Son, también, representaciones de un patrón semejante al rasgo que se desea localizar, pero en este caso, variables en cuanto a tamaño y forma, con objeto de adaptarse a todo tipo de variaciones posibles de ese rasgo.
- Métodos basados en la búsqueda de puntos mediante el uso de wavelets (onditas). En los trabajos enmarcados en esta técnica se utiliza la descomposición en onditas de Gabor para extraer puntos de la imagen. Dichos puntos rasgo obtenidos se utilizan para formar un grafo que se almacena en la base de datos. Las caras de test que se presenten al sistema serán comparadas con las de la base de datos

mediante técnicas de emparejamiento de grafos. Se pueden preprocesar en una etapa previa con máscaras de convolución aplicadas en las regiones de interés para resaltar la información importante, y posteriormente aplicar "wavelets".

- Métodos mixtos. Existen soluciones que combinan varias técnicas, por ejemplo, una técnica de localización automática de la cabeza y de rasgos faciales como ojos, nariz y boca, mediante técnicas de procesamiento de imágenes, y para la localización de los ojos emplea también un filtrado de Gabor.

6.5.1.3 Sistemas de reconocimiento facial basados en rasgos locales

Existe abundante literatura presentando distintas aportaciones, que difieren en la elección de los rasgos locales 2D y de los puntos fijos a medir (para representar y comparar a los individuos), así como en la metodología para su extracción automática. La mayoría de los que proponen un sistema de reconocimiento facial de este tipo abordan cada una de las etapas que realiza. Tras la etapa de extracción de características, se realiza el reconocimiento o clasificación. En general, las técnicas de reconocimiento o clasificación van asociadas al tipo de rasgos que se utilizan.[44]

Métodos basados en geometría pura.

Los primeros sistemas de reconocimiento basados en rasgos locales que aparecieron en la literatura, empleaban características geométricas para efectuar el reconocimiento, y estas continúan empleándose como se muestra en algunos trabajos más recientes.

El problema del reconocimiento de formas o patrones a resolver en este tipo de sistemas, trata de reconocer si un patrón, cara, pertenece a una clase, individuo. A cada patrón se le asocia su vector de características, que contiene las propiedades que lo diferencian del resto de patrones, de modo que las que se escojan han de contener información discriminante y han de ser medibles en las imágenes. Cada clase se caracteriza por un conjunto de valores de características o atributos que la hacen distinguible de las demás, y puede contener uno o varios elementos, según si se cuenta o no con varios patrones de la misma persona para el entrenamiento.

Dada la representación mediante vectores, el sistema debe decidir a qué clase pertenece un nuevo patrón. Si el vector de características del individuo a reconocer es similar al que caracteriza una clase, se dirá que ese miembro pertenece a dicha clase. La función de decisión que generalmente se ha utilizado en este tipo de sistemas en la fase de identificación es la distancia euclídea en el espacio «-dimensional, siendo n el número de características utilizadas.

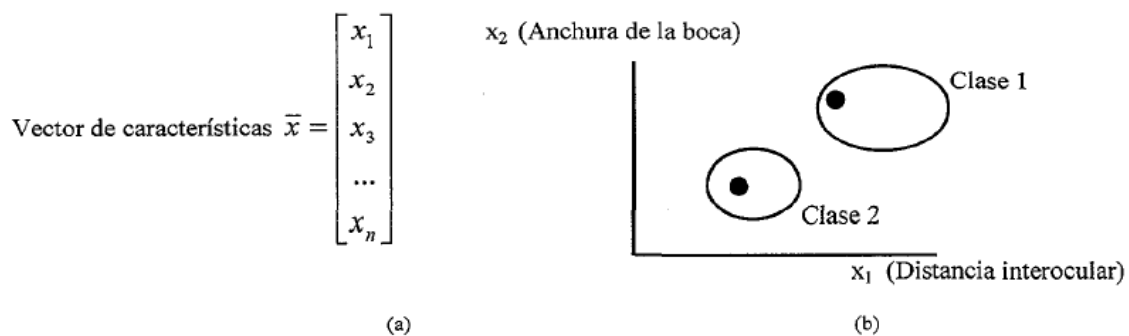


Figura 38. (a) Vector de n características que representa a una cara o patrón, y (b) clases de patrones correspondientes a dos individuos distintos, para una representación que utiliza dos características.

Las medidas o características obtenidas de los rasgos extraídos de las imágenes (ojos, boca, etc.), deben venir dadas por propiedades discriminantes que diferencien a un individuo del resto y deben provenir de rasgos distinguibles en las imágenes, ignorándose el resto de la información. Un vector formado por ellas (vector de características) representa de forma comprimida a la cara en el sistema de reconocimiento y por tanto constituirá el patrón reconocer.[49] Son características geométricas comúnmente utilizadas, las siguientes:

- Anchura de la cara.
- Posición de la nariz.
- Anchura y altura de la nariz.
- Anchura y altura de los ojos.
- Distancia interocular.
- Posición vertical de la boca, anchura de la boca, grosor de los labios.
- Radio que describe la curva de la barbilla.

- Grosor de la ceja y posición vertical respecto a la posición central de los ojos, etc.

Estos métodos pertenecen a la categoría de métodos de correspondencia estructural. Este tipo de características se deben normalizar en cuanto a posición y escala. Estas medidas geométricas calculadas a partir de posiciones de puntos característicos 2D, no son invariantes ante rotaciones de la cara. Además carecen de información de la escala real. Los puntos extraídos automáticamente de las imágenes faciales 2D también están provistos de imprecisiones debidas a los suaves cambios de intensidad (p.e. cuando los labios o las pestañas son muy claros o cuando aparecen sombras dependientes de la posición de la cara respecto de la fuente de luz). Otra causa de imprecisión es la repetitividad de los píxeles, pues a veces un punto de la cara a extraer (p.e. el extremo lateral de un ojo) ocupa varios píxeles, teniendo que optar el algoritmo por uno de ellos.

La variación entre individuos de dichas características no es muy grande comparada con las imprecisiones que en ocasiones se obtienen. Por ello, el resultado de un sistema de reconocimiento de este tipo requiere un entorno de adquisición de imágenes muy controlado .

En la etapa de formación de este tipo de sistemas de reconocimiento, se generan los vectores de características de los individuos de entrenamiento conocidos por el sistema siendo, por tanto, los que el sistema es capaz de reconocer. El proceso de reconocer a un individuo nuevo que se presenta al sistema, consiste generalmente en obtener su vector de características, y buscar entre los vectores de los individuos de la base de datos aquél que minimice alguna función de distancia. Esta técnica requiere resolver las etapas de detección y de extracción de la cara del fondo, segmentación, extracción de características 2D, dependientes todas ellas enormemente de las condiciones de adquisición de las imágenes, e identificación.

Método de emparejamiento de grafos elásticos.

Esta técnica fue introducida por Wiskott en 1997 y se ha evaluado con bases de datos de gran tamaño proporcionando buenos resultados. Las caras se representan mediante grafos etiquetados basados en una transformada de Gabor, es decir por conjuntos de componentes de respuesta al filtro de Gabor (jets). Un conjunto de jets correspondiente a un rasgo se denomina bunch y se utilizan para la extracción del

grafo correspondiente a una imagen. El objetivo del método de emparejamiento de grafos elásticos (en inglés Elastic Graph Matching, EGM) es encontrar en la imagen test los puntos rasgo y extraer así un grafo de la imagen. Utilizan la información de la fase para posicionar los nodos de forma precisa.

Uno de los sistemas con mayor éxito en esta categoría es el de emparejamiento de grafos, basado en arquitecturas de enlaces dinámicos (Dinamik Link Architecture, DLA). Dichas arquitecturas resuelven algunos de los problemas conceptuales de las redes neuronales artificiales, por ejemplo, utilizan plasticidad sináptica y son capaces de formar instantáneamente conjuntos de neuronas agrupadas en grafos estructurados manteniendo las ventajas de los sistemas de redes neuronales.[50]

Modelos Ocultos de Markov.

Se han empleado para el reconocimiento facial en algunos trabajos. No precisan que las localizaciones de los rasgos locales se hallen con gran exactitud. Los métodos basados en Modelos Ocultos de Markov (Hidden Markov Models, HMM) usan cadenas de píxeles de la frente, ojo, nariz, boca y barbilla.

Redes Neuronales de convolución.

En 1997 una serie de científicos, desarrollan un sistema basado en una red neuronal de convolución (convolutional neural network, CNN), utilizando un método de aprendizaje no supervisado basado en un mapa autoorganizativo (self-organizing map, SOM) para reconocimiento facial automático basado en rasgos locales.[51]

6.5.2. Técnicas holísticas

Como alternativa al reconocimiento basado en rasgos locales, aparecieron a principios de los años 90 del pasado siglo técnicas 2D basadas en el cómputo de características holísticas o globales. Dichas técnicas que consideran la información completa de todos los píxeles de la imagen, tanto de la cara como del fondo, como patrón, también se denominan técnicas basadas en la apariencia. En ciertas aplicaciones donde el formato de las imágenes es controlado, pueden evitar las dificultosas etapas de localización y segmentación de la cara del fondo y de extracción de características, sin embargo, requieren que las imágenes estén normalizadas en cuanto a escala. Son más apropiadas cuando hay ligeras variaciones en la pose,

rotaciones alrededor de las tres direcciones espaciales, en la expresión facial, si es leve, y cuando la imagen está deteriorada. Sin embargo, estos sistemas son más sensibles a las variaciones en la iluminación que los basados en rasgos locales, aunque proporcionan muy buenos resultados cuando las condiciones de adquisición son uniformes en cuanto a escala e iluminación.

Los métodos basados en rasgos son menos sensibles a las variaciones en la iluminación y en la pose en comparación con los métodos holísticos. Las técnicas propuestas en la literatura pueden clasificarse en dos grupos: las que se basan en el Análisis de Componentes Principales (PCA, del inglés Principal Component Analysis) por un lado, y las que enmarcaremos en la categoría de Técnicas conexionistas.

6.5.2.1 Técnicas basadas en el análisis de componentes principales

Se trata de la aplicación directa del análisis de componentes principales (PCA) al reconocimiento facial, lo que se denomina método de eigenfaces. El análisis de componentes principales se utiliza para procesar imágenes faciales y como base de una técnica de reconocimiento facial. De esta técnica se derivan otras como el método Fisherfaces (Análisis Discriminante Lineal de Fisher). Ambas técnicas, Eigenfaces y Fisherfaces, se han experimentado en bases de datos de un gran número de imágenes proporcionando buenos resultados cuando las imágenes han sido capturadas bajo condiciones de adquisición uniformes. Por ello, el esfuerzo actualmente se está orientando a la búsqueda de la independencia de las condiciones de la adquisición, para adquirir robustez ante cambios de iluminación, rotación, traslación y escala principalmente.

Método de eigenfaces.

Se trata de un método estadístico para la obtención de información global de la imagen facial. Es el que realiza una aplicación directa del Análisis de Componentes Principales, en el que se trabaja con las imágenes completas como patrones de entrada. En este método las caras se representan mediante vectores de características, pero estas no son las intuitivas derivadas de los ojos, boca, etc. Las imágenes se codifican calculando su variación respecto del resto de la colección de caras, sin hacer ningún juicio sobre sus rasgos locales.[52]

La inspiración de esta técnica viene del hecho de que para una imagen facial $I(x,y)$ consistente en una matriz o array bidimensional de $N \times N$ valores de intensidad, si ésta se representa mediante el vector de longitud N^2 formado por todos los valores de sus píxeles alineados, el espacio vectorial de todas las imágenes de longitud N^2 , de cualquier objeto o escena (caras, coches, paisajes, etc.), será de dimensión N^2 . Sin embargo, en este espacio de tan enorme dimensión, sólo un pequeño subespacio es el de imágenes de caras, denominado espacio de caras (eigenspace). La idea principal del análisis de componentes principales es encontrar los vectores de la base de este subespacio de menor dimensión, es decir, aquellos que mejor describen la distribución de las imágenes del conjunto de caras.

Los vectores de la base que definen el subespacio de caras, se denominan eigenfaces (autocaras, en español). Cualquier cara pertenecerá a este subespacio, y por tanto se podrá escribir en términos de una combinación lineal de eigenfaces siendo los coeficientes de esta combinación lineal, las componentes del vector de características que la representan en el sistema de reconocimiento facial. Puesto que el máximo número de posibles eigenfaces o vectores de la base de este subespacio es igual al número de caras del conjunto de entrenamiento, los vectores de características que se obtendrán con este método serán como máximo de esta longitud (mucho menor que su longitud inicial N^2).

Para crear un sistema de este tipo, en primer lugar hay que calcular la base ortonormal de vectores que genera el subespacio de caras. Para obtener una representación de las caras en este sistema mediante un vector de características, se proyectan en el subespacio cuya base está formada por un conjunto reducido de vectores o caras ejemplo (eigenfaces). Para representar una cara nueva en este subespacio, hay que expresarla como una combinación lineal de eigenfaces y representarla en el sistema de reconocimiento como un vector compuesto por los coeficientes de dicha combinación lineal.

Una vez obtenidos los vectores de características se realiza un proceso de clasificación. Se compara dicho vector con todos los de la base de datos de individuos conocidos (previamente obtenidos de la misma manera) mediante el cálculo del valor de alguna función de distancia que proporcione una medida de similitud (es decir, mediante algún clasificador basado en la distancia al vecino más cercano). En el clasificador utilizado está basado en la distancia euclídea: aquel vector de la Base de

Datos que minimice dicha función de distancia, corresponde al individuo más parecido al que se desea identificar. En ese trabajo se indica la posibilidad de utilizar un umbral de decisión o valor de distancia tal que si la distancia del individuo test al individuo más parecido (mínima) es menor que un umbral de decisión, el sistema da como resultado que se ha identificado al individuo, y que su identidad es la del individuo más cercano. Si la distancia mínima es mayor que el umbral, el sistema da como resultado que el individuo no se encuentra en la base de datos. Se establece además otro umbral tal que si la distancia al más cercano lo excede, el sistema determina que la imagen test no es una cara. Por tanto, este método también sirve para detectar una cara en una imagen y reconocer si una imagen cualquiera es una cara o no.

Las etapas de este sistema son las siguientes:

- 1) Inicialización: se adquiere el conjunto de entrenamiento de imágenes de caras y con él se calculan las eigenfaces, que definen el espacio de caras.
- 2) Representación: para una imagen entrada se calculan sus pesos basándose en la imagen de entrada y las eigenfaces, mediante proyección.
- 3) Reconocimiento: se determina si la imagen es una cara o no, viendo su distancia al espacio de las caras.
- 4) Identificación: si es una cara, mediante sus pesos se averigua si es conocida o desconocida. Si es conocida, se da su identidad.
- 5) Aprendizaje: si la misma cara desconocida se introduce varias veces, se calculan sus pesos y se incorpora al conjunto de caras conocidas.

Este método se ha aplicado para otros propósitos, entre ellos, para detección de caras en imágenes, compresión de imágenes, etc.

El Análisis de Componentes Principales permite trabajar con datos dados por imágenes completas, alineando la matriz de píxeles para representarla como un vector, y también por vectores de información local extraída de las imágenes. Se han publicado numerosos trabajos relacionados que emplean esta técnica para clasificar vectores provenientes de rasgos locales consistentes en subimágenes de la cara, en lugar de caras completas. De este modo se trataría de técnicas híbridas entre locales y holísticas, porque emplean la apariencia de los rasgos locales. Se han testado

diferentes partes de las imágenes de las caras o rasgos, entre ellos, las imágenes de los ojos, boca, nariz, etc., (cuyos vectores de la base del espacio reducido son denominados eigeneyes, eigenmouths, eigennoses, respectivamente), que por ser de dimensiones más reducidas resultan mucho más rápidos.[53]

Método de eigenfaces probabilístico.

Se presenta como una mejora de la tasa de reconocimiento de la técnica de Análisis de Componentes Principales, en este caso introduciendo el método bayesiano de clasificación, que utiliza medidas probabilísticas de similitud, en lugar del basado en distancia euclídea.

Método de Fisherfaces

El Análisis Discriminante Lineal (LDA) es una técnica estadística clásica que proporciona la proyección que maximiza el ratio de dispersión entre los datos de las diferentes clases respecto a los de la misma clase.

Las características obtenidas mediante este método son útiles para la clasificación de patrones pues hace que patrones pertenecientes a la misma clase estén más próximos los unos de los otros y que los de diferentes clases se alejen entre ellos. Este método aplicado al reconocimiento facial se ha denominado método Fisherfaces. Puede aplicarse tanto a imágenes de niveles de gris como a vectores de características. Al igual que el método PCA es un método estadístico que se basa en realizar una proyección para obtener una representación. En el caso de PCA, la proyección obtenida reduce la dimensión de los datos, manteniendo la máxima información de las variaciones entre los datos. Aunque LDA aporta mejores resultados de discriminación, éste sólo cuenta con una matriz de transformación, y cuando se tienen muchas clases y grandes variaciones, una única matriz no es suficiente para efectuar una buena discriminación.

Métodos de clasificación mediante SVM.

Las Support Vector Machines (SVMs) son clasificadores que han demostrado tener una gran capacidad de generalización y por tanto ofrecen gran robustez en el reconocimiento de objetos en general y en el reconocimiento facial automático en particular. En el caso de que las clases sean linealmente separables, proporcionan el hiperplano óptimo que separa los patrones de entrenamiento, dicho hiperplano

maximiza la suma de distancias entre las clases más cercanas. Los patrones de entrenamiento son proyectados en un espacio de mayor dimensión usando una función kernel. Las funciones más utilizadas como kernel son polinomiales, exponenciales y sigmoidales.

Métodos basados en líneas rasgo.

En ellos se sustituye el método de cálculo de la distancia punto-a-punto por un método de cálculo de la distancia entre un punto y una línea rasgo que une dos puntos correspondientes a dos muestras de caras almacenadas.

ICA (Independent Component Analysis).

El Análisis de Componentes Independientes es un método utilizado para calcular vectores de la base de un espacio, que sean estadísticamente independientes. Esta técnica se ha utilizado para la obtención de características en reconocimiento facial automático, y puede considerarse una generalización de PCA. También trata de obtener un subespacio de proyección previo a la clasificación. ICA se ha aplicado a la separación de señales de audio, y recientemente se ha comenzado a aplicar al reconocimiento facial automático y de expresiones faciales. La técnica PCA consiste en obtener las proyecciones de las muestras en un subespacio de menor dimensión, tal que es óptimo en el sentido del error cuadrático medio, es decir, que al realizar la proyección inversa al espacio original, el error de reconstrucción de los datos comprimidos por este método, es mínimo. De hecho, si se incluyen todos los autovectores con autovalores distintos de cero la codificación se realiza sin pérdida de información. Sin embargo, ICA busca la transformación lineal que minimice la dependencia estadística entre los vectores de la base. Los vectores de la base del subespacio de proyección obtenidos mediante ICA, no son ortogonales, ni están ordenados bajo ningún criterio (a diferencia de los obtenidos mediante PCA).[54]

La ICA es una técnica para extraer variables estadísticamente independientes, de una mezcla de ellas. Tiene como objetivo encontrar una transformación lineal de los datos de entrada usando una base tan independiente (desde el punto de vista estadístico) como sea posible.

Por ello se considera que ICA es una generalización de PCA. PCA trata de obtener una representación de las entradas en variables no correladas, mientras que ICA trata de obtener una representación en variables estadísticamente

independientes. Las imágenes de la base que se obtienen mediante ICA contienen más información local que aquellas obtenidas con PCA, que aportan información global. Sin embargo, el tiempo de entrenamiento es mucho mayor para ICA que para PCA.

6.5.2.2 Técnicas conexionistas

Las redes neuronales artificiales son clasificadores que se implementan con objeto de imitar al hombre en la tarea de reconocimiento. Se componen de elementos computacionales que operan en paralelo, llamados nodos o neuronas, que se caracterizan por unos pesos que se van adaptando durante su entrenamiento para mejorar la precisión del reconocimiento. Esta modificación de los pesos de las conexiones sinápticas entre neuronas constituye el aprendizaje de la red neuronal.

Las redes neuronales son interesantes para ser utilizadas en sistemas de reconocimiento facial debido a:

- 1) La capacidad de estos sistemas para aprender automáticamente.
- 2) La propiedad de estos sistemas para continuar funcionando de forma aceptable cuando se utilizan imágenes incompletas, ruidosas o deterioradas.
- 3) El interés por la búsqueda de modelos que permitan el procesamiento masivamente paralelo.
- 4) La similitud de estos sistemas con los modelos neurofisiológicos del cerebro. Las redes neuronales se han usado en el ámbito del reconocimiento facial para resolver varios problemas: clasificación de las imágenes según el sexo del individuo, reconocimiento facial, detección de caras en imágenes y clasificación de expresiones faciales.

Los modelos conexionistas que se aplican al reconocimiento facial pueden operar directamente con representaciones de caras basadas en las propias imágenes, es decir pueden operar directamente sobre la matriz de intensidades de píxeles, sin previa extracción de rasgos locales, incluso con imágenes de caras a muy baja resolución. También se pueden introducir como entradas a las redes neuronales vectores de características geométricas. Por tanto, las redes neuronales cuentan con la posibilidad de clasificar tanto datos numéricos de rasgos locales como el conjunto

de todos los píxeles de la imagen, es decir pueden trabajar o bien con características locales o bien con características globales.

6.5.3. Detección de caras en la imagen 2D

Una etapa necesaria en numerosos sistemas de reconocimiento facial es la de localización de la cara en la imagen, reconociendo si es una cara u otro tipo de patrón, para su posterior segmentación aislándola del resto de objetos. El éxito o fracaso en esta etapa es crucial para el posterior reconocimiento: una cara no puede ser reconocida si no ha sido correctamente localizada previamente en la imagen.

Como se indicó con anterioridad, el problema de la detección y localización de caras es un problema de investigación en sí mismo, que tiene otras aplicaciones además del reconocimiento facial automático. Hasta mediados de los 90 la mayoría de los trabajos tenían por objetivo detectar una vista frontal de la cara de un background libre de objetos o no. Las técnicas usaban plantillas de toda la cara, plantillas deformables basadas en rasgos, el color de la piel o redes neuronales que clasificaban imágenes completas para decidir si contenían una cara o no. Posteriormente se abordó el problema de detectar varias caras presentes en una misma imagen. Esta tarea es difícil y compleja cuando el fondo de la imagen contiene otros objetos. El problema se hace más difícil cuando la cara aparece parcialmente ocluida (por ejemplo, debido a presencia de barba, de gafas, etc.).

La información que proporciona la imagen a baja resolución es una descripción global suficiente para algunas tareas como localizar la cara en las imágenes o determinar el sexo, aunque para tareas de identificación se requiere información obtenida a más alta resolución. Esto justifica la aparición de algoritmos que emplean multiresolución y multiescala, para abordar las diferentes etapas de la percepción facial.

6.5.3.1 Métodos basados en redes neuronales.

Entre los métodos basados en redes neuronales que se han experimentado con bases de datos grandes, se encuentran el de Rowley y Kanade, el de Sung y Poggio y el de Delakis.[44]

Aplican redes neuronales a la detección de caras en posición frontal y vertical en una escena donde puede haber varias imágenes faciales. Comparados con los

métodos basados en detección de rasgos y en el uso de plantillas, estos métodos que entrenan sistemas con un gran número de muestras, han proporcionado mejores resultados.

6.5.3.2 Métodos basados en el Análisis de Componentes Principales.

Se han utilizado para la localización de caras en fondos que contienen además otros objetos. Un sistema detecta la presencia de una cara en una escena para posteriormente localizarla mediante el método del análisis de componentes principales. Se utilizan imágenes que contienen la línea del borde de la cara (silueta de la cara), para entrenar el sistema.

Una de las técnicas recientes de detección de caras con rotación en profundidad consiste en entrenar el sistema con muestras de múltiples vistas (multi-view based methods). Estas técnicas producen mejores resultados que las basadas en rasgos invariantes cuando el ángulo de rotación en profundidad (fuera del plano x-y de la imagen) es mayor que 35°.

6.5.3.3 Métodos que emplean Support Vector Machines.

Recientemente han aparecido algunos trabajos que emplean Support Vector Machines para clasificar si una imagen contiene o no una cara. Abordan el problema de la detección de caras en imágenes cualesquiera, pudiendo contener varias caras y fondos complejos, sobre una base de datos de un gran número de imágenes, con resultados de 97,1%, 74,2% sobre dos conjuntos de test diferentes.

6.6. Reconocimiento facial a partir de imágenes 3D

La gran mayoría de los investigadores han planteado el reto de reconocimiento facial automático como un problema de reconocimiento de objetos 2D, resolviéndolo a partir de información extraída de imágenes bidimensionales de intensidad. Estas técnicas de reconocimiento dependen en gran medida de las condiciones de adquisición de las imágenes, siendo muy sensibles a variaciones de las imágenes en la iluminación, escala, orientación de la cara y expresiones faciales. La proyección de un objeto tridimensional a dos dimensiones conlleva gran pérdida de información que

sería muy útil para mejorar la precisión de estos sistemas. Entre la información que desaparece está la escala real. Nótese que el peinado de una persona, el tipo y la posición de la fuente de luz, los gestos y la orientación de la cara en el momento de la captura, son causa de grandes variaciones entre imágenes 2D del mismo individuo, aunque estén tomadas en lapsos cortos de tiempo.

Existen pocos estudios de identificación facial mediante técnicas de visión tridimensional. Uno de los principales objetivos del reconocimiento facial 3D es solucionar los problemas existentes en los métodos de reconocimiento 2D mencionados anteriormente, así como evaluar la capacidad discriminante de la información de la profundidad, respecto de la de reflectancia (intensidad o color de las imágenes 2D). Aunque se espera que la primera proporcione mejores resultados, no se ha realizado todavía ningún estudio riguroso que valide esta expectativa, debido a la escasa proliferación hasta hace poco de digitalizadores 3D y de Bases de Datos de imágenes 3D que permitan la evaluación de este tipo de técnicas.

En este apartado se aborda el reconocimiento facial automático mediante técnicas de visión tridimensional, que utilizan información 3D para interpretar la escena, en este caso, para reconocer a las personas a partir de su cara.

6.6.1. Técnicas de adquisición de imágenes 3D

Los sistemas de adquisición de imágenes 3D capturan imágenes tridimensionales de las superficies de los objetos que muestrean. Las técnicas que emplean para la captura se clasifican en técnicas activas o pasivas, según si el dispositivo utilizado para la captura (sensor) realiza o no algún tipo de actividad encaminada a controlar la geometría de la discretización, respectivamente.

6.6.1.1 Técnicas pasivas.

Son las que utilizan sensores pasivos (cámaras fotográficas o cámaras de vídeo) exclusivamente, que capturan imágenes 2D de intensidad o secuencias de vídeo con las que se reconstruye la escena 3D. La Visión Estereoscópica (o visión estéreo) es la técnica pasiva de recuperación de información 3D por excelencia, derivándose de ella otras técnicas pasivas existentes, por ejemplo la extracción de la forma a partir del movimiento. Mediante la Visión Estereoscópica es posible obtener puntos 3D de objetos del mundo real utilizando dos o más imágenes bidimensionales

de los mismos (o vistas) adquiridas desde distintas posiciones. Si el número de imágenes utilizadas es dos, se dice que el sistema de visión estéreo es binocular, y trinocular si se utilizan tres.

El desarrollo de técnicas de visión estereoscópica en la década de los 80, hizo posible el cálculo de puntos 3D de un objeto mediante el emparejado de sus proyecciones en varias imágenes tras una etapa previa de calibración de las cámaras con que fueron capturadas. Las características consistentes en distancias entre puntos 3D están desprovistas de los errores que se tienen utilizando técnicas que extraen información 2D de las imágenes, causados por transformaciones geométricas del objeto en el espacio. Sin embargo, conllevan cierto error introducido en las etapas de calibración y de obtención de correspondencias causado por la digitalización de las imágenes y por la repetitividad de los píxeles, así como por los procesos de cálculo de las coordenadas 3D y de los parámetros del modelo en la calibración que se realizan mediante métodos aproximados

Este tipo de método pasivo tiene un rango más amplio de utilización que los métodos activos, pues los sensores implicados por consistir en cámaras convencionales, son de bajo coste y de un tamaño más reducido que los sensores de rango activos. Sin embargo requieren resolver el problema de la correspondencia de puntos en las imágenes 2D que intervienen en el proceso, así como realizar una etapa de calibración de las cámaras. El problema de la correspondencia es difícil y complejo, y en el caso de imágenes faciales no hay muchos puntos distinguibles en las imágenes susceptibles de ser emparejados como correspondencias debido a la uniformidad en la textura de las caras. Una forma de obtener puntos distinguibles consiste en proyectar luz estructurada en la cara del individuo (por ejemplo, usando una diapositiva con una retícula de un patrón) para generar puntos distinguibles y por tanto extraíbles de las imágenes, lo que constituiría una técnica activa. Las proyecciones de los puntos en las imágenes dependen de la posición de la cara respecto del sensor y de la forma de la superficie.

6.6.1.2 Técnicas activas.

Son aquellas que usan un sensor activo implicado en alguna operación, por ejemplo, que permita variar el enfoque o interferir en la escena en el proceso de la adquisición de las imágenes emitiendo haces controlados de energía (luz o sonido) desde una posición y orientación conocidas. Los sensores de rango activos pueden

utilizar una gran variedad de principios físicos: radares, sonoros, interferometría holográfica, enfoque o triangulación activa. Este último es uno de los más utilizados en Visión Artificial, pues en este principio se basan numerosos sensores de rango actuales.

Los sensores de rango basados en el principio de Triangulación Activa, utilizan una cámara de adquisición de imágenes 2D para capturar imágenes en color, y además disponen de una fuente de emisión de un haz de luz (p.e. láser) que se proyecta sobre el objeto. Detectan en la imagen del objeto capturado con la cámara, la posición donde se proyecta el haz emitido, para realizar una medida de la distancia en el espacio tridimensional desde el sensor al punto del objeto donde se proyecta el haz (conocidas la dirección del haz de luz y la posición de la cámara respecto de la fuente del haz) .

Los métodos basados en el principio de Triangulación Activa, tienen las ventajas de proporcionar mapas densos y precisos de coordenadas 3D, de ser muy útiles en ambientes industriales, de no necesitar de una calibración de las cámaras y de no tener que resolver el problema de la correspondencia de puntos entre imágenes (etapa tan costosa y sujeta a una tasa de error demasiado elevada para muchas aplicaciones).

Las imágenes de rango, codifican la forma de la superficie 3D de los objetos directamente, representando la superficie tridimensional de los mismos de forma realista, y se capturan mediante digitalizadores 3D. Las imágenes 3D de rango pueden venir dadas por:

- Una lista de coordenadas (x,y,z) de puntos 3D, referidos a un sistema de referencia del espacio tridimensional, sin especificación de ordenación alguna (forma xyz o nube de puntos).
- Una lista de coordenadas (x,y,z) de puntos 3D, referidos a un sistema de referencia del espacio tridimensional y las conexiones existentes entre ellos (habitualmente formando triángulos) para formar las celdas conectadas formando un mallado de superficie 3D.
- Una matriz de valores z de profundidad de puntos según las direcciones de los ejes X e Y de la imagen, llamada forma ry tal que la información

espacial viene dada de forma explícita. Dichas imágenes se denominan imágenes de profundidad o mapas de profundidad.

Los digitalizadores 3D denominados sensores de rango (o escáneres 3D) proporcionan gran densidad de puntos (miles de puntos) de la superficie de los objetos muestreados, en pocos segundos. Además, si son autofocus, proporcionan datos del objeto muestreado y no del fondo, con lo que se evita la etapa de la localización de la cara en la escena.

Los avances en velocidad y en capacidad de memoria de los computadores han permitido la manipulación y la visualización de este tipo de representaciones realistas y detalladas de los objetos, en el ámbito de los Gráficos por Computador y de la Visualización. Además, la disponibilidad de datos que describen detalladamente la forma 3D de los objetos denominados "de forma libre" (por no ajustarse a superficies cuádricas ni planas) permite a la Visión por Computador avanzar en el desarrollo de nuevas formas de reconocimiento y de localización de objetos 3D.

6.6.2. Técnicas de reconocimiento 3D basadas en rasgos locales

Existen muy pocos trabajos de Reconocimiento Facial Automático a partir de imágenes 3D en general, y por tanto son muy escasos los que utilizan cada una de las técnicas existentes. Una de las razones para ello, es la aparición reciente tanto de los digitalizadores como de técnicas de Visión Tridimensional que trabajen con las imágenes de rango 3D proporcionadas por ellos. En el ámbito del Reconocimiento de Objetos Tridimensionales de Forma Libre, se ha propuesto el uso de la geometría diferencial de superficies para obtener descriptores, habiendo sido empleada por diferentes autores en la literatura de reconocimiento facial para la etapa de extracción de rasgos faciales. Entre los descriptores de objetos tridimensionales de forma libre representados mediante mallados poligonales de superficie (nubes de puntos con información de la conectividad) invariantes ante transformaciones geométricas, están la curvatura de la superficie en un punto del objeto 3D así como el ángulo entre normales de los polígonos (facetas) del mallado alrededor de un punto de la superficie 3D. Ambos se han utilizado recientemente para describir la superficie de los objetos 3D en el ámbito de la Visión Tridimensional. A continuación se describen las técnicas más relevantes de reconocimiento facial automático 3D a partir de rasgos locales.

6.6.2.1 Métodos basados en la curvatura local de la superficie.

La curvatura local en los puntos de la superficie y las diferencias angulares entre normales tienen la ventaja de ser invariantes ante transformaciones geométricas. Para una superficie, la curvatura en un punto se caracteriza por las direcciones en las cuáles la normal a la superficie cambia más y menos rápidamente. Estas curvaturas principales k_1 y k_2 respectivamente, codifican el promedio de cambio de la orientación de la superficie en las dos direcciones extremas. Así, las curvaturas principales k_1 y k_2 se han utilizado para caracterizar y codificar información discriminadora sobre la forma de los objetos tridimensionales con objeto de reconocerlos. Las curvas denominadas parabólicas y las curvas "cresta" (curvas ridge, en inglés), que son las que contienen a sendos extremos (mínimos y máximos) de curvatura de la superficie (intuitivamente podría decirse que son las que unen todo el valle y las que unen todos los picos de una cadena montañosa, respectivamente) también se proponen como rasgos a extraer de la superficie 3D

6.6.2.2 Métodos basados en plantillas.

Se basan en un sistema de reconocimiento facial 3D basado en plantillas, en el que se realiza una segmentación a partir de una clasificación de las partes de la superficie en regiones planas, esféricas y superficies de revolución. También emplea descriptores basados en cálculos de la curvatura en las imágenes de rango. Dichas imágenes tienen una resolución menor de 0.4 mm. Los datos se almacenan en coordenadas cilíndricas. Debido a que es necesario calcular las derivadas segundas, se realiza un proceso de suavizado y de eliminación de ruido, mediante un filtrado de Gauss. Posteriormente, se efectúa una clasificación de las regiones de acuerdo a características de concavidad, convexidad y puntos de silla. Tras localizar las regiones de nariz, ojos y boca, se encuentran otras como cuello, frente y carrillos (utilizando la propiedad de suavidad en estas superficies). Esta información se utiliza para normalizar las imágenes en cuanto a escala e interpolarlas a un mallado cilíndrico, de tal manera que el volumen del espacio entre las superficies de la cara y del cilindro caracteriza cada cara para el posterior proceso de reconocimiento.

6.6.2.3 Métodos basados en el cálculo de la firma.

Otra técnica de representación de rasgos faciales de imágenes de rango usando información local, se basa en el cálculo de la firma (signature) en determinados puntos de la superficie 3D para la obtención de características. La firma

en los puntos de las imágenes de rango se usa para la representación de objetos 3D de forma libre.[55]

6.6.2.4 Métodos que utilizan datos 3D e información de color.

Como se ha señalado anteriormente, también existen sistemas que comparan datos 3D con datos 3D. También existen propuestas que manejan información conjunta 2D y 3D. Entre ellos, están las que utilizan las imágenes rango 3D y las imágenes en niveles de gris 2D obtenidas simultáneamente. Estos métodos proponen un sistema de verificación a partir de imágenes de rango capturadas mediante la técnica de Triangulación Activa utilizando un sistema de adquisición.

6.6.3. Técnicas de reconocimiento 3D holísticas

En este apartado se hará un repaso a los diferentes grupos de técnicas de reconocimiento 3D que habitualmente emplean la representación completa de la superficie facial 3D, en lugar de sus características locales. Estas se han clasificado en dos categorías: las basadas en modelado de objetos tridimensionales y las que emplean el análisis de componentes principales.

6.6.3.1 Técnicas basadas en modelado 3D

Como se mencionó anteriormente, son muy pocos los trabajos de reconocimiento facial automático mediante técnicas de visión tridimensional en la literatura. Pues bien, la mayoría de ellos se basan en esta técnica, es decir, en la utilización de modelos 3D. Ello es debido a que en esta técnica se efectúa el reconocimiento de los individuos a partir de imágenes 2D, y no de imágenes 3D. Se emplea un modelo 3D de la cara para obtener información 3D de las imágenes 2D sin necesidad de disponer de un sistema de adquisición 3D (que hasta hace poco resultaban muy costosos). Sin embargo, estos trabajos basados en modelos 3D sintéticos presentan la desventaja de que se requiere la búsqueda de puntos en la imagen 2D para adaptar el modelo a la cara presente en ella (siendo esta una tarea compleja, sujeta a errores y muy dependiente de las condiciones de adquisición).

El Reconocimiento Facial Automático mediante la utilización de un modelo 3D adaptable a imágenes faciales 2D, se enmarca dentro de las Técnicas de reconocimiento 3D pues se extrae información de la forma tridimensional a partir de imágenes 2D de la siguiente forma: se dispone de un modelo 3D de la cabeza

humana, que es una representación de su superficie mediante un mallado, creado en base al conocimiento que se tiene de cómo es una cara genérica. Contiene puntos de control que pueden desplazarse hasta alcanzar sus correspondencias en las imágenes 2D disponibles. Estos desplazamientos producen deformaciones en el modelo para ajustarse a las imágenes del individuo particular, y generar así un modelo particularizado (o individualizado) del sujeto de las imágenes. Las deformaciones se traducen en modificaciones de ciertos parámetros del modelo que pueden servir para representar o caracterizar al individuo.

En los últimos años, las disciplinas de Gráficos por Computador y Visión Artificial intersectan en el área del modelado de objetos tridimensionales de formas libres, al utilizarse como una de las técnicas básicas empleadas en el reconocimiento de objetos tridimensionales. En general, se trata de realizar la correspondencia entre puntos de un modelo 3D con puntos de una imagen (habitualmente 2D) para determinar la pose del objeto o la existencia de ese modelo en la escena o bien el reconocimiento basado en el modelado 3D.

El desarrollo de modelos de superficie facial, crea un marco de investigación muy amplio en análisis, síntesis y codificación de expresiones faciales, que tiene aplicaciones en animación por computador, compresión de la información para telecomunicaciones por videoconferencia, reconocimiento facial, etc..

Aplicaciones como videoconferencia, videoteléfono, motivaron la aplicación de un modelo 3D para extracción de características de una cara. El empleo de un modelo 3D para reconocimiento aporta información global de la forma 3D de la cara, además de la información local provista por él.

6.6.3.2 Técnicas 3D basadas en el análisis de componentes principales

Como se ha visto hasta ahora, entre los trabajos existentes en reconocimiento facial mediante técnicas de visión tridimensional son pocos los que presentan resultados de clasificación. Hasta el momento, se ha trabajado más en extracción de características (representación) y en métodos de adquisición de las imágenes, mientras son escasos los resultados de evaluación de estos sistemas. Como se ha comentado, entre las razones fundamentales que justifican este hecho se pueden destacar: la falta de bases de datos de imágenes faciales 3D (las existentes son muy

recientes), la escasa proliferación de los digitalizadores 3D hasta hace pocos años, y el hecho de que este problema no se ha abordado hasta fechas recientes como un problema de Visión Tridimensional.

Existen trabajos recientes, aunque escasos, sobre Reconocimiento Facial Automático a partir de imágenes 3D de rango, utilizando el Análisis de Componentes Principales para la representación en un espacio de dimensión más reducida. Surgen motivados por la necesidad de cuantificar el poder discriminatorio que aporta la información 3D de la profundidad respecto del que proporcionan las imágenes 2D.

Para ello, comparan la utilización de imágenes completas 2D y de sus correspondientes mapas de profundidad 3D separadamente, y posteriormente, ambas representaciones conjuntamente, para llegar a la conclusión de que la fusión de información 2D y 3D proporciona un incremento de la tasa de acierto.

- Imágenes 2D en color: llevan a cabo el cálculo de eigenfaces para cada una de las tres componentes en el espacio de color (YUV), es decir obtienen tres conjuntos de autovectores, uno para cada plano de las imágenes, correspondiente a cada componente de color. Para cada cara nueva se proyectan sus correspondientes planos en cada uno de los tres subespacios. En las comparaciones se evalúan tres distancias euclídeas, una para cada componente de color. Una imagen test pertenece a la clase k si el producto de las tres distancias a la clase k en cada subespacio es mínimo con respecto a todas las clases.
- Mapas de profundidad: son matrices en las que a cada elemento (píxel) le corresponde el valor de la distancia desde el punto correspondiente de la escena, al sensor. Estos mapas, por tanto, son tratados igual que si se trabajase con imágenes 2D en escala de grises, en las que a cada posición de la imagen le corresponde un valor, con la única diferencia de que en lugar de tratarse de valores de intensidad son valores de distancia (profundidad). El conjunto de entrenamiento viene dado por 40 mapas de profundidad de tamaño 74x66, uno por cada persona. Puesto que sólo contaban con un mal lado 3D de cada individuo, usaron como conjunto test los mapas de profundidad obtenidos tras rotar ligeramente los mallados 3D que emplearon para el entrenamiento, alrededor de los

ejes j y x (no había rotaciones respecto del eje de profundidad z). Con una rotación de $\pm 2^\circ$ alrededor del eje vertical y , la tasa de reconocimiento fue del 93%, para una rotación de $\pm 5^\circ$, la tasa de reconocimiento fue del 89% y para rotaciones de $\pm 10^\circ$ la tasa de reconocimiento se reducía al 85%.

- Imágenes 2D en niveles de gris por un lado y mapas de profundidad sin información de color por otro: se obtienen dos conjuntos de autovectores correspondientes a sendos conjuntos de datos de entrada. Para las comparaciones, se evalúan dos distancias euclídeas, una en cada subespacio. Cuando el producto de las dos distancias a una clase en sendos subespacios sea mínimo, se determina que el individuo test es de dicha clase.

6.7. Reconocimiento Facial 3D en Medicina Forense

En la literatura de medicina forense referente a la superposición de una imagen 3D de un cráneo sobre una cara de una fotografía con objeto de identificar un cadáver, se han definido puntos que relacionan cara con cráneo así como el grosor de los tejidos blandos en los mismos y en el resto de la cabeza, dependientes de la raza, la edad y el sexo, con objeto de poder comprobar si el cráneo puede coincidir con el de un individuo del que sólo se tienen fotografías en vivo. Se han realizado estudios sobre la relación que hay entre la cara y el cráneo en antropología forense. Los puntos en los que se hace la superposición de cara sobre cráneo (aquellos que definen unívocamente un cráneo), se encuentran en partes distintivas de la superficie 3D de la cara, a saber, en cambios de curvatura o esquinas de su superficie, y por tanto, constituyen comienzos y fin de rasgos fisionómicos de la cara y la cabeza. Con las medidas de los tejidos blandos, se obtienen datos mediante medidas craneométricas típicas en antropología (resultado de experimentos tanto sobre cadáveres como sobre radiografías o tomografías en amplias poblaciones), y ello permite la superposición de la cara sobre el cráneo. Sin embargo, a veces se trata de puntos en los que el color es homogéneo (por pertenecer a zonas de la piel de color uniforme), y consecuentemente, es difícil automatizar su búsqueda en imágenes 2D de intensidad,

y consecuentemente, es un experto forense el que realiza el trabajo de seleccionarlos de forma manual.[57]

6.8. Reconocimiento facial a partir del movimiento

A mediados de los años 90 del pasado siglo comenzaron a aparecer numerosos trabajos de reconocimiento facial automático a partir de secuencias de vídeo. También para este propósito, se han desarrollado numerosos métodos para segmentar caras en secuencias de vídeo, pero no se ha resuelto para el caso general y ni mucho menos para aplicaciones todavía ideales como la vigilancia mediante vídeo en aeropuertos.

El reconocimiento facial automático a partir de imágenes estáticas tiene inherentes muchas ventajas. En aplicaciones como las de pasaportes, DNIs, licencias de conducir, por ejemplo, debido a la naturaleza controlada de la adquisición, el problema de detección y segmentación es sencillo. Sin embargo, en una escena por ejemplo de un aeropuerto, sería difícil localizar y segmentar una cara si sólo se cuenta con una imagen estática. La segmentación de una persona es mucho más fácil si se utiliza el movimiento.

El reconocimiento facial automático a partir de secuencias de vídeo es un problema a resolver muy importante en aplicaciones de vigilancia. También tiene aplicación en el análisis de acciones y el comportamiento humano, por ejemplo, en ambientes inteligentes interactivos, por ejemplo, para la detección del cansancio en la conducción de automóviles a partir de expresiones faciales y de los movimientos de la cabeza, así como en el reconocimiento de expresiones faciales.



7 voz



7.1. Introducción

Para el estudio de un reconocedor de voz como instrumento de identificación biométrica, es indispensable el conocimiento y análisis de ese milagro evolutivo que es nuestra capacidad para expresarnos oralmente, comúnmente conocido como “el habla”.

Este “milagro” es posible gracias a la evolución del sistema fonador humano, el cual permite generar sonidos a su voluntad y modular tono e intensidad dentro de unos rangos marcados o adquiridos.

Por lo tanto, como antesala de los sistemas identificadores, su funcionamiento, análisis y comparaciones pasaremos a repasar la historia del habla y la capacidad de comunicación en la historia de la humanidad con una somera explicación a nivel fisiológico de como nuestro cuerpo emite y genera estos sonidos.

Pero antes de todo esto tenemos que entender el mecanismo anatómico y fisiológico que nos otorga a la raza humana la capacidad de expresarnos oralmente, el aparato fonador.

La voz es el sonido producido voluntariamente por el aparato fonatorio humano. Es el instrumento más antiguo y más natural con el que se puede hacer música. El investigador sueco Johan Sundberg, especializado en la voz humana, la ha definido así: “Sonido complejo formado por una frecuencia fundamental (fijada por la frecuencia de vibración de los ligamentos vocales) y un gran número de armónicos o sobretonos”.

Según las leyes de la acústica, hay tres elementos indispensables para la producción del sonido: un cuerpo vibrante, un medio elástico que propague las vibraciones y una caja de resonancia que las amplifique, a fin de que puedan ser percibidas por el oído. El aparato fonatorio humano cumple con las tres condiciones señaladas: el cuerpo que vibra son las cuerdas vocales, situadas en la laringe; el medio de propagación es el aire proveniente de los pulmones y la caja de resonancia está formada por la cavidad torácica, la faringe, las cavidades oral y nasal y una serie de elementos articulatorios, que son los labios, los dientes, el alvéolo, el paladar, el velo del paladar y la lengua.

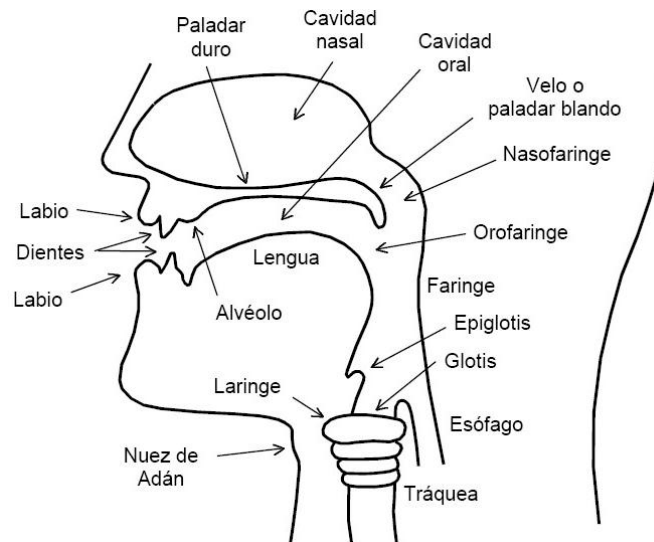


Figura 39. Corte esquemático del aparato fonatorio

La fonación se realiza durante la espiración, cuando el aliento o aire contenido en los pulmones sale de éstos, bajo la presión de los músculos abdominales, los intercostales y el diafragma, y, a través de los bronquios y la tráquea, llega a la laringe. Allí choca con las cuerdas vocales, también conocidas como pliegues vocales, que no tienen forma cordófonas, pues se trata de unas bandas o membranas hechas de tejido muscular liso.[58]

Las cuerdas vocales son cuatro. Las dos superiores (o bandas ventriculares) no participan en la fonación, proceso que se efectúa con las dos cuerdas inferiores. Éstas son, en realidad, dos pequeños músculos elásticos, orientados en la laringe de delante hacia atrás. Por su parte anterior las cuerdas están unidas al cartílago tiroides (que puede palparse sobre el cuello, inmediatamente por debajo de la unión con la cabeza; en los varones suele apreciarse una protuberancia conocida como nuez de Adán). Por detrás, van sujetas a sendos cartílagos aritenoides, los cuales pueden separarse voluntariamente por acción de músculos. La abertura existente entre ambas cuerdas se denomina glottis.

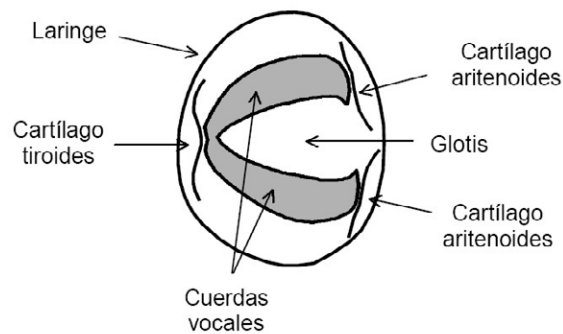


Figura 40. Corte esquemático de la laringe según un plano horizontal

Si las cuerdas vocales se encuentran separadas, la glotis adopta una forma triangular. El aire pasa libremente, sin hacer presión, lo que permite respirar y, prácticamente, no se produce sonido. Por el contrario, si la glotis comienza a cerrarse las cuerdas se juntan. El aire choca contra ellas y experimenta una turbulencia, emitiéndose un ruido de origen aerodinámico conocido como aspiración (aunque en realidad acompaña a una espiración o exhalación).

Al cerrarse más, las cuerdas vibran a modo de lengüetas, lo que produce un sonido tonal. La frecuencia de este sonido depende de varios factores, entre otros del tamaño y la masa de las cuerdas vocales, de la tensión que se les aplique y de la velocidad del flujo del aire proveniente de los pulmones. A mayor tamaño, menor frecuencia de vibración, lo cual explica por qué en los varones, cuya glotis suele ser mayor que la de las mujeres, la voz es en general más grave.

Si aumenta la tensión de las cuerdas, la frecuencia vibratoria también lo hace, siendo el sonido producido más agudo. Así, para lograr emitir sonidos en el registro extremo de la voz es necesario un mayor esfuerzo vocal. A igualdad de otras condiciones, el aumento del flujo de aire también supone el aumento de la frecuencia, razón por la cual si se incrementa la intensidad de emisión se tiende a elevar espontáneamente el tono de voz.

El sonido producido en las cuerdas vocales es muy débil. Para convertirse en audible debe ser amplificado, lo que sucede en los órganos resonadores, es decir, las cavidades torácica y bucofaríngea, las fosas nasales, los senos nasales, frontales y maxilares y la cavidad craneana.

Una vez que la voz sale de los resonadores, es moldeada por los articuladores, que son una serie de elementos situados en el interior de la boca: paladar, lengua, dientes y labios. La articulación es el proceso mediante el cual alguna parte del aparato fonatorio interpone un obstáculo para la circulación del flujo de aire.

En su camino hacia el exterior, la frecuencia fundamental del sonido, derivada del frotamiento de las cuerdas vocales al paso del aire, va siendo enriquecida por los armónicos o sobretonos producidos por los resonadores, que son, a la postre, los que confieren a la voz una apariencia acústica, una peculiaridad y un timbre concretos.

La voz humana tiene una extensión, o respuesta en frecuencias, que oscila entre los 80 y los 1.000 Hz, aunque su eficiencia es mayor entre los 200 y los 700 Hz. En lo que se refiere a su estructura, los órganos de la fonación son iguales en el hombre y en la mujer, sólo difieren por sus dimensiones (mayor capacidad pulmonar, cuerdas vocales más largas y más sólidas en el hombre; diferente volumen de las cavidades de resonancia, etc.) Por término medio, entre adultos, las voces femeninas se sitúan una octava más alta que las masculinas.

7.2. Historia y evolución del habla y del lenguaje

El origen y la evolución del lenguaje sigue siendo un tema no resuelto y continúa siendo objeto de debate en la actualidad por paleoantropólogos y lingüistas, que se ven obligados a basar sus estudios en evidencias indirectas debido a que el lenguaje es virtualmente invisible en el registro arqueológico. Las primeras hipótesis ya se iniciaron en los tiempos de Darwin .

El lenguaje es uno de los rasgos de conducta más distintivos de nuestra especie, ya que ningún otro animal se comunica de la manera que lo hacemos nosotros. Por este motivo, sólo la comunicación humana puede ser llamada 'lenguaje', siendo los sistemas de comunicación animales 'medios de transmisión de información no lingüísticos'. Así pues, debemos descartar que el lenguaje sea solamente una forma superior de alguna función animal: el lenguaje es un fenómeno cualitativamente nuevo y, como tal, no tiene verdadero análogo dentro del mundo animal.

El ser humano tiene una tendencia instintiva a hablar, y en la actualidad, sabemos con certeza que el lenguaje evolucionó dentro del linaje humano, pero seguimos cuestionándonos cuándo se originó y cómo tuvo lugar esa evolución. Algunos autores defienden que emergió tempranamente en la historia de los homínidos y, siguiendo un proceso de evolución lento y gradual, llegó a la forma moderna en tiempo reciente. Para otros, en cambio, el lenguaje tuvo una aparición muy tardía y sufrió una evolución muy rápida. Las bases en que se apoyan estos argumentos son muy variadas: unos tienen una base anatómica, otros lo relacionan con prácticas culturales, algunos establecen nexos comparativos con los gritos o sonidos emitidos por diversos animales, en algunos casos se relaciona con la gesticulación, hay quienes lo comparan con el lenguaje de los sordomudos, etc.

Entre los investigadores del tema, existe cierto consenso en proponer que la evolución del lenguaje siguió distintos grados sucesivos, es decir, el camino que nos conduce a él es la suma de una serie muy diversa de aptitudes comunicativas cuya filogénesis se extiende, al menos, a dos millones de años atrás. Esa capacidad comunicativa toma un rumbo distinto a partir de la aparición de un sistema de producción eficaz de sonidos (aparato bucofaringolaríngeo) y de un medio de identificación fonético/semántico que relaciona las combinaciones de sonidos con significados (gracias a la compleja red de conexiones neuronales que en gran parte se ignoran). Tal capacidad es exclusivamente humana y pudo generarse mediante mutaciones genéticas muy precisas.

Los cambios que ha sufrido el cerebro a lo largo de la evolución humana los hemos podido constatar a partir del aumento progresivo de su volumen y mediante la determinación de ciertas áreas o regiones a partir de la elaboración de moldes endocraneales, pero, en cambio, no tenemos una base anatómica comprobada de la evolución de nuestro aparato bucofaringolaríngeo.

Esta circunstancia nos obliga a aceptar soluciones hipotéticas, cuyas bases son discutibles. Es evidente que para poder hablar se necesitan unos órganos adecuados, que hoy en día sólo poseemos los humanos, pero además se precisa tener algo que comunicar, sea por la necesidad de transmitir lo que pensamos a otras personas y que éstas nos comprendan, así como entender sus respuestas, con lo cual queda establecido un diálogo, con plena conciencia de su contenido: indudablemente, como dijo Tobías, se habla con el cerebro.

Con todo lo expuesto, vemos que el problema a resolver es multidisciplinario: anatómico, etológico, neurológico, fisiológico, paleontológico, lingüístico e incluso religioso. En este trabajo nos limitaremos a exponer los factores objetivos que consideramos básicos para comprender las diversas hipótesis sobre cómo y cuándo surgió el lenguaje.

Antes de entrar en la cuestión se hace necesario apuntar un breve esquema sobre la formación y evolución del género *Homo* y sobre su contexto.

Dentro de la clase de los mamíferos, el hombre actual pertenece al orden de los primates, suborden Anthroidea, infraorden catarrinos, superfamilia Hominoidea, familia Hominidae, género *Homo*, especie *sapiens* y subespecie *sapiens*. Dentro de la misma familia se engloban: humanos, gorilas, chimpancés, bonobos y orangutanes. Con el término de 'homínidos' incluimos los distintos fósiles que por su estructura anatómica sugieren que son primates evolucionados con una tendencia a la adquisición de unos caracteres similares a los que creemos que han conducido al *Homo sapiens*. En el tiempo transcurrido desde la aceptación de las teorías evolutivas, los árboles genealógicos que conducen al hombre han sufrido múltiples variaciones, ya que los restos fósiles son escasos y están generalmente muy deteriorados: hemos de aceptar que tan sólo conocemos algunos eslabones. Por esta razón, mostramos un cuadro evolutivo muy resumido, que acoge sólo los grupos principales y englobando dentro de un mismo grupo diversas especies de homínidos con características comunes. El homínido más antiguo conocido hasta el momento, ancestro común de los chimpancés y los humanos actuales, tiene unos 6-7 millones de años de antigüedad y se denomina *Sahelanthropus thadensis*. A partir de hace 4 millones de años aparecen en el registro fósil homínidos de muy variados caracteres anatómicos que han sido clasificados en diversas especies pero, que a modo de simplificación, hemos englobado bajo el nombre de australopitecinos. Este grupo evoluciona durante casi 2 millones de años aparentemente sin innovaciones tecnológicas importantes. Durante este tiempo, se ha constatado en el registro fósil un aumento progresivo del volumen cerebral pero sin ningún cambio comportamental importante. Hace unos 2,5 millones de años apareció en África un homínido con un cerebro cuantitativamente mayor que sus predecesores y fue denominado *H. habilis* [59]. Este homínido destaca por ser el primer representante del género *Homo* y desarrolló una industria de mayor complejidad. Aproximadamente 1,5 millones de años atrás, *H. habilis* dio lugar a *H. erectus*, una especie clave en la evolución humana, con unas características

esqueléticas similares a los humanos modernos y una capacidad craneal bastante cercana a la nuestra. El *H. erectus* fue el primer homínido en salir de África y llegó hasta el este de Asia, donde tomó una línea evolutiva distinta a la de sus predecesores africanos.

Por este motivo, el *H. erectus* africano se denomina *H. ergaster*, mientras que el asiático sigue con la denominación de *H. erectus*. En el mismo momento en que *H. erectus* empieza a desaparecer del registro fósil (hace unos 150.000 años), una nueva especie entra en el linaje humano: *H. sapiens*. *H. sapiens sapiens*, nuestra especie, se origina en África pero tempranamente coloniza Europa y Asia. A su llegada a Europa se encuentra con una especie nueva y endémica: los *H. sapiens neanderthalensis*. Ambas especies conviven hasta hace unos 40.000 años, cuando estos últimos se extinguen.

Como vemos, la evolución de los homínidos abarca unos 6-7 millones de años, englobando un período geológico denominado Plio-Pleistoceno (desde hace 5 millones de años hasta hace 10.000 años), y fue el resultado de la relación de éstos con el medio ambiente. Los homínidos interaccionaron con el medio a través de una serie de comportamientos relacionados con la alimentación, la locomoción, la sexualidad y la territorialidad, que afectan tanto a nivel biológico como social. Estos comportamientos determinaron una serie de estrategias adaptativas que fueron sometidas a fuertes presiones selectivas que actuaron sobre los homínidos como consecuencia de las numerosas crisis ecológicas que se dieron en su entorno, el África oriental del Plio-Pleistoceno. Estas diferentes estrategias adaptativas favorecieron la diversificación biológica de los homínidos provocando profundas transformaciones corporales (órganos de los sentidos, dentición, cerebro) y sociales.[60]

A continuación, se hará un repaso de algunos elementos anatómicos que indudablemente influyeron en la aparición del lenguaje.

Encéfalo. Al igual que no existe un centro encefálico de la conciencia, como opinaba Descartes quien la situaba en la glándula epífisis o corpus pineale, no existe un centro cerebral del lenguaje, sino que es una función global. La mayor maquinaria neuronal para las funciones del lenguaje se localiza en el hemisferio izquierdo en la gran mayoría de los humanos actuales, pero, como ocurre con muchas funciones mentales complejas, el lenguaje no puede ser delimitado a áreas concretas. No

obstante, diversos estudios basados en los trastornos del lenguaje permitieron localizar determinadas áreas cerebrales que eran las responsables de dichas patologías. Así, Broca determinó que las lesiones situadas en la región prerrolándica de la tercera circunvolución cerebral del hemisferio dominante (generalmente el izquierdo), daban lugar a la denominada afasia motora, en que el paciente no puede articular las palabras.

Posteriormente Wernicke describió la afasia expresiva, que se localiza en la primera circunvolución temporal del hemisferio dominante. Lesiones en dicha área impiden, pues, la comprensión del lenguaje hablado. Otras lesiones en el área cerebral que forma el denominado cuadrilátero de Pierre Marie no permiten la lectura (alexia) o la escritura (agrafia). Actualmente sabemos que la transmisión de mensajes entre las áreas de Broca y Wernicke se realiza a través de los fasciculus arcuatus. Sin embargo, no conocemos el mecanismo intrínseco por el que se rige nuestro encéfalo y cómo permite la asociación de fonemas, la comprensión gramatical, la asociación de ideas u otros muchos mecanismos imprescindibles para el lenguaje. Según varios estudios, no tenemos ningún problema para reconocer 10 e incluso 25 fonemas por segundo, podemos recordar de 45.000 a 90.000 palabras y podríamos comunicar unos 100.000 pensamientos.

Aparato bucofaringolaríngeo Como ha quedado expuesto en el apartado anterior, hablando pormenorizadamente del aparato fonador, la presencia de este aparato es esencial, pues de él depende la modulación del aire espirado que da origen a los sonidos, posibilitando, así, el lenguaje articulado. La posición baja de la laringe es exclusiva del hombre moderno.

La glotis evita la entrada de los alimentos en la tráquea, circunstancia que nos impide deglutir y respirar al mismo tiempo, pues correríamos el riesgo de que lo que ingiriéramos, sólido o líquido, penetrase en nuestros pulmones poniendo en peligro nuestra vida. Este hecho ya lo constató Darwin, pero tiene la excepción de los bebés de nuestra especie, que conservan la posición alta de la laringe hasta aproximadamente los dos años de edad.

El aire espirado pasa por la hendidura de las cuerdas vocales, y la lengua humana, cuya situación es muy posterior con relación a la faringe, modula su salida y es fundamental para la emisión de las palabras. La amplia motilidad de la lengua así

como su gran sensibilidad permiten modificar la morfología de la cavidad bucal; y los movimientos de los labios permiten completar las variaciones del trayecto que sigue el aire expelido y, de este modo, se originan los distintos sonidos del lenguaje.

En los otros primates ocurre como en los bebés humanos: la laringe está situada en una posición muy elevada, circunstancia que les permite comer y respirar al mismo tiempo, pero les impide una modulación amplia de los sonidos.[61]

Este descenso de la laringe que en la actualidad ocurre sólo en nuestra especie, ya empezó, según Laitman en *H. ergaster/erectus*. Esta hipótesis está basada en la observación del grado de flexión de la base del cráneo, que algunos autores consideran que es un reflejo de la posición de la laringe. En individuos adultos de nuestra especie el basicráneo presenta una forma arqueada, mientras que en otros mamíferos y en los bebés humanos esta estructura es mucho más plana. Analizando esta característica en el registro fósil Laitman concluyó que los australopitecinos dispondrían de una laringe en posición alta, similar a los chimpancés y que el descenso empezó en *H. erectus*, en el que la posición de la laringe equivaldría a la de un niño humano moderno de 8 años de edad. No obstante, la flexión basicraneal completa, semejante a la de los humanos actuales, no se conseguiría hasta los *H. sapiens* arcaicos, hace unos 300.000 años. Por su parte, Lieberman afirma que el habla es un fenómeno tardío, posiblemente relacionado sólo con *H. sapiens neanderthalensis* y *H. sapiens sapiens*. Finalmente, Krantz sostiene que el descenso de la laringe no tuvo lugar hasta hace 40.000 años, como resultado de un proceso evolutivo propio de nuestra especie.

No obstante, todas estas hipótesis están formuladas en base a escasos restos fósiles conservados. La base del cráneo se conserva en muy pocos especímenes y entre ellos no encontramos ningún representante de *H. habilis*. Este hecho no nos permite contrastar el estudio del aparato bucofaringolaríngeo con el estudio de los moldes endocraneales. Además, estos argumentos pierden fuerza si tenemos en cuenta que determinadas patologías que modifican la base del cráneo no tienen ninguna repercusión en el habla. Por ejemplo, la platibasia y la impresión basilar, que son afecciones frecuentes e indudablemente repercuten en la situación de la laringe, no entrañan en la clínica unas alteraciones fonéticas valorables.

7.2.1. Teorías sobre el origen del lenguaje

La aparición del lenguaje se debe a causas naturales. Pero, ¿cuál fue el sustrato que permitió su origen? Hay diferentes teorías que intentan explicar cómo apareció el lenguaje, que básicamente se engloban en tres:

Teoría gestual. Este modelo fue descrito originariamente por Hewes, quien propuso que la necesidad de emplear las manos en dos cosas a la vez –usar herramientas y comunicarse mediante gestos durante la caza– habría servido de presión selectiva para la transferencia del lenguaje gestual al vocal/oral. Actualmente, diversos autores defienden que el primer tipo de lenguaje que usaron nuestros ancestros era un lenguaje de signos, ya que anteriormente a tener unos órganos que les permitieran el lenguaje oral su forma de comunicación tuvo que ser gestual. Así que esta teoría no excluye a ninguna de las otras dos.

Teoría cognitiva o cerebral. La aparición del lenguaje se reduce a los cambios explicados anteriormente sobre la evolución del cerebro y la laringe. Así pues, la presencia de determinadas áreas cerebrales, áreas de Broca y de Wernicke, la lateralización cerebral y la modificación de la laringe son los elementos necesarios para que surja el lenguaje, independientemente de cualquier otro factor social o biológico.

Teoría social. Muchos factores contribuyen a dar un origen social al lenguaje, entre los que destacan: el papel del trabajo como causa que determinó el progreso de la comunicación oral; el hecho de compartir la comida que obligaría a actitudes cooperantes y precisaría de un lenguaje para regularlo; la necesidad de transmisión de conocimientos de padres a hijos, etc. A nuestro entender, el modelo social es el que posee una mayor capacidad explicativa, ya que establece una relación entre comportamiento social, lenguaje, elaboración de artefactos y desarrollo cerebral.[59]

A lo largo de la evolución del género Homo tomamos como punto de partida el bipedismo, que dejó las manos libres permitiendo fabricar y transportar herramientas, lo que contribuyó a un aumento de la capacidad craneal. Estas características son un buen indicio relativo a la aparición de capacidades cognitivas nuevas (inteligencia, lenguaje, etc.). Todo parece indicar que el lenguaje solo pudo aparecer en una especie en la que el proceso de simbolización, aunque primitivo, fuese ya muy activo (sueños, rituales, supersticiones, etc.). Este proceso de simbolización va ligado a complejidad

social e implica una vida comunitaria muy intensa. Así pues, a parte de los indicios anatómicos, se consideran importantes los indicios culturales sobre el origen del lenguaje. Por ejemplo, construir herramientas es una tarea compleja, ya que requiere: una selección previa de los materiales (planificación), contar con una técnica precisa para golpear los núcleos de piedra de la forma adecuada y elegir las lascas idóneas en función del tipo de instrumento que se quiere obtener. Si a todo este proceso añadimos la transmisión de estos conocimientos a la descendencia, implica una habilidad cognitiva muy desarrollada. Se ha demostrado que hay una correlación entre encefalización y tamaño del grupo en primates. En grupos grandes, el lenguaje es la única forma de mantener la cohesión social.

Durante el grado erectus y después de éste, concurren circunstancias que nos hacen preguntarnos hasta qué punto no habrían aparecido ya en el pleistoceno medio (730.000-130.000 años BP) algunos rasgos –como el lenguaje y el simbolismo– propios de una organización social compleja

Los seres humanos modernos hablamos con un lenguaje de doble articulación: unimos los sonidos básicos (fonemas) en palabras y las palabras en frases. La primera y la segunda articulación parecen depender de órganos distintos. Para vocalizar (primera) es necesario disponer de una laringe situada en posición baja y para enlazar los fonemas formando palabras según reglas sintácticas muy precisas (segunda) se requiere la intervención del cerebro.

Este último salto hacia el enlace fonético/semántico de doble articulación es producto de una maduración lenta y gradual de las capacidades cognitivas del ser humano y se cree que tuvo lugar en *H. sapiens sapiens*, o quizás también en los neandertalenses.

Podemos establecer unas directrices sobre el origen del lenguaje: – Previo al surgimiento del lenguaje fue necesario el desarrollo de capacidades psíquicas superiores, constatado mediante el aumento de la capacidad craneal a lo largo de la evolución humana.

- La elaboración de artefactos fue un elemento fundamental en la evolución de un sistema de representación lingüístico, ya que no habría pensamientos sin lenguaje.

- Fue necesaria la existencia de una estructura grupal, con estrechas relaciones entre los individuos y su medio ambiente.

Tanto los moldes endocraneales como la estructura de la laringe indican una adquisición gradual de las capacidades lingüísticas a través de la historia de los homínidos, empezando probablemente con el origen del género Homo. El primer representante del género, H. habilis, surgió hace aproximadamente 2,5 millones de años en África y se le atribuye una capacidad craneal de unos 700 cm³. El estudio de sus restos fósiles ha revelado la presencia en su cerebro de las dos principales áreas implicadas actualmente en el habla en los humanos modernos, las áreas de Broca y Wernicke. H. habilis ha sido el primer homínido en mostrar ambas áreas bien desarrolladas, y también ha sido el primer homínido en mostrar una cultura material compleja. Hay una indudable relación entre cultura y lenguaje, quizás la fabricación de herramientas de una manera sistemática fue la chispa responsable del desarrollo de capacidades cognitivas complejas, entre ellas el lenguaje, y de esta práctica surgió la necesidad de transmitir esta cultura a la descendencia. En este punto, el lenguaje permitió dar un salto cualitativo en el sistema de transmisión de conocimientos generación tras generación.

No obstante, el lenguaje similar al de los humanos modernos tuvo una aparición mucho más tardía, resultado de una evolución progresiva de los homínidos y su ambiente. Se cree que no fue hasta la aparición de los arcaicos H. sapiens, hace aproximadamente 300.000 años, en que el lenguaje da el último salto hacia el enlace fonético/semántico de doble articulación.

7.3. Historia del reconocimiento de voz

Por último y para cerrar esta fase introductoria, haremos un breve repaso a la historia del reconocimiento de voz como tecnología de identificación, historia con mucho bagaje si caemos en la cuenta de la complejidad tecnológica que entraña.

La historia del reconocimiento de voz empezó en el año de 1870. Alexander Graham Bell quiso desarrollar un dispositivo que fuese capaz de proporcionar la palabra visible para la gente que no escuchara. Bell no tuvo éxito creando este dispositivo, sin embargo, el esfuerzo de esta investigación condujo al desarrollo del teléfono. Más tarde, en los años 30 del siglo XX Tihamer Nemes, científico húngaro,

quiso patentar el desarrollo de una máquina para la transcripción automática de la voz. La petición de Nemes fue denegada y este proyecto fue calificado de poco realista[62].

No fue hasta 1950, 80 años después del intento de Bell, cuando se hizo el primer esfuerzo, coronado con cierto éxito, para crear la primera máquina de reconocimiento de voz. La investigación fue llevada a cabo por los laboratorios de AT&T. El sistema tuvo que ser entrenado para reconocer el discurso de cada locutor individualmente, pero una vez especializada la máquina tenía una exactitud de un 99 por ciento de reconocimiento.

El primer sistema de reconocimiento de voz fue desarrollado en 1952 sobre una computadora analógica que reconocía dígitos del 0 al 9, este sistema era dependiente del locutor. Los experimentos dieron una exactitud de reconocimiento del 98%. Más tarde, en esa misma época, se creó un sistema que reconocía consonantes y vocales.[63]

Durante la década de los sesenta, los investigadores que trabajaban en el área de reconocimiento de voz empezaron a comprender la complejidad del desarrollo de una verdadera aplicación dentro del reconocimiento de voz, y se comenzaron a realizar aplicaciones con vocabularios pequeños, dependientes del locutor y con palabras de flujo discreto.

El flujo discreto es la forma como hablan los locutores, es decir, con pequeñas pausas entre palabras y frases. También, durante 1960, la Universidad de Carnegie Mellon e IBM emprendieron una investigación en reconocimiento de voz continuo. El impacto de esta investigación no se reflejó hasta después de los años setenta.

Ya entrados en la década de los sesenta, se desarrolló el primer sistema de reconocimiento de voz comercial. Se mejoraron las aplicaciones de los sistemas dependiente del locutor que requerían una entrada discreta y tenía un vocabulario pequeño. Por otra parte la Advanced Research Projects Agency (ARPA) de la Sección americana de Defensa se mostró interesada en la investigación de reconocimiento de voz. ARPA comenzó sus investigaciones enfocándose al habla continua y usando vocabularios más extensos. También se mejoró la tecnología de reconocimiento para palabras aisladas y continuas. En esta misma época se desarrollaron técnicas para el reconocimiento de voz como timewarping, modelado probabilístico y el algoritmo de retropropagación.

Durante los años ochenta el reconocimiento de voz se vio favorecido por tres factores: el crecimiento de computadoras personales, el apoyo de ARPA y los costos reducidos de aplicaciones comerciales. El mayor interés durante este periodo de tiempo era el desarrollo de vocabularios grandes. En 1985 un vocabulario de 100 palabras era considerado grande. Sin embargo, en 1986 hubo uno de 20.000 palabras. También durante esta época hubo grandes avances tecnológicos, ya que se cambió del enfoque basado en reconocimiento de patrones a métodos de modelado probabilísticos, como los Modelos Ocultos de Markov (HMM).[64]

Para los años noventa los costos de las aplicaciones de reconocimiento de voz continuaron decreciendo y los vocabularios extensos comenzaron a ser habituales. También las aplicaciones independientes del locutor y de flujo continuo (lo contrario al flujo discreto, es decir, en el habla no hay pausas significantes) comenzaron a ser más comunes.

7.4. Actores en el reconocimiento de voz

El reconocimiento del habla parece tan natural y sencillo para las personas que se pensó que podría ser fácilmente realizado por las máquinas. Sin embargo, cuando se empezó a profundizar en el tema, se comprobó que esto no es así. De hecho, es un tema que se ha revelado más complicado que la producción automática de voz.[65]

Los ejemplos a lo largo de la historia lo han demostrado: las primeras y rudimentarias máquinas parlantes aparecieron en la segunda mitad del siglo XVIII, mientras que los primeros intentos en máquinas capaces de reconocer la voz no aparecieron hasta principios del siglo XX, con la máquina de Flower, que conseguía escribir el alfabeto fonográfico pronunciado por una persona. Cinco son los factores que determinan la complejidad del Reconocimiento del Habla:

- 1) El Locutor. Es quizás el aspecto que introduce mayor variabilidad en la forma de onda entrante, y por tanto requiere que el sistema de reconocimiento sea altamente robusto. Una persona no pronuncia siempre de la misma forma, debido a distintas situaciones físicas y psicológicas (es la llamada variabilidad intra-locutor). Existe además gran variedad entre distintos locutores (hombres, mujeres, niños), diferencias según la edad o la región de origen (variabilidad

interlocutor). Es mucho más sencillo que un sistema funcione para un determinado locutor y que este lo haya entrenado previamente (se dice que el sistema es dependiente del locutor), a que un sistema funcione para cualquier locutor (sistema independiente del locutor).

- 2) La forma de hablar. Es el segundo factor que determina la complejidad de un reconocedor de habla. El hombre pronuncia las palabras de una forma continua, y debido a la inercia de los órganos articulatorios, que no pueden moverse instantáneamente, se producen efectos coarticulatorios. Ello, unido a las variaciones introducidas por la prosodia, hace que una palabra al principio de una frase sea diferente que cuando se dice en medio, o que sea diferente dependiendo de que es lo que le precede o le sigue. Un reconocedor es relativamente sencillo si sólo tiene que reconocer una palabra dicha de forma aislada (reconocedor de palabras aisladas) y es más complejo si debe reconocer las palabras de una frase, pero introduciendo una pausa entre cada dos de ellas (habla conectada). El sistema más complicado es aquel que debe funcionar reconociendo habla continua, que es la forma natural de hablar.
- 3) El Vocabulario. Definido como el número de palabras diferentes que debe reconocer el sistema. Cuanto mayor es el número de palabras más difícil es el reconocedor, y esto por dos motivos. El primero, porque al aumentar el número de palabras es más fácil que aparezcan palabras parecidas entre sí, y el segundo porque el tiempo de tratamiento aumenta al incrementarse el número de palabras con las que comparar. Una posible solución a este problema consistiría en el empleo de unidades lingüísticas inferiores a la palabra (alófonos, sílabas, etc.) que en principio tienen un número limitado, e inferior al de posibles palabras. Sin embargo, la dificultad de reconocer estas unidades es aún mayor debido a que su duración es muy corta, la frontera entre dos unidades sucesivas es muy difícil de establecer y los efectos coarticulatorios son mucho más fuertes que entre palabras.

- 4) La Gramática. Es el conjunto de reglas que limita el número de combinaciones permitidas de las palabras del vocabulario. En general la existencia de una gramática en un reconocedor ayuda a mejorar la tasa de reconocimiento, al eliminar ambigüedades y puede ayudar a disminuir la necesidad de cálculo, al limitar el número de palabras en una determinada fase del reconocimiento ("perplejidad" de la gramática). En sistemas de palabras aisladas en los que no existe una gramática en el sentido estricto del término, se puede entender por tal el número de palabras a reconocer. Si, por ejemplo, el sistema debe reconocer un número telefónico urbano, la gramática de este sistema dice que el vocabulario son los diez dígitos, y debe reconocer un conjunto de siete dígitos, de forma que si el sistema reconoce más o menos, es que hay algún error.
- 5) El Entorno físico. Es una parte tan importante como las anteriores para definir el reconocedor. No es lo mismo un sistema que funciona en un ambiente poco ruidoso, como puede ser el despacho de un médico, o el que tiene que funcionar en un coche o en una fábrica. O por ejemplo, el que debe de funcionar a través de la línea telefónica, con la consiguiente reducción de banda o el que recibe la voz a través de un micrófono, que tiene mayor ancho de banda que la línea telefónica.

7.5. Sistemas de reconocimiento de voz

Podríamos afirmar que, genéricamente, el principal objetivo que el reconocimiento de habla persigue es proporcionar una "apropiada" interacción hombre-máquina a través de órdenes habladas. Así, los resultados que esta tecnología proporcione deberán contrastarse con los derivados de otras alternativas como son: teclados, paneles, ratones, etc., en cuanto a si proporcionan un control de procesos de interacción hombre-máquina más o menos "apropiado". Las principales características que diferencian a los sistemas basados en reconocimiento del habla frente a otras alternativas son: la naturalidad que supone utilizar el habla en las operaciones de comando y control, y la precisión y robustez en la comunicación para diferentes usuarios y diferentes entornos. La primera de ellas debería representar la ventaja natural de los sistemas basados en la tecnología del habla. Aunque la

experiencia nos ha enseñado que, si bien el habla es la forma natural de comunicación entre personas, en el diálogo hombre-máquina esto no es tan obvio; piénsese, por ejemplo, en los diversos estudios que reflejan el elevado número de personas incapaces de responder frente a una máquina. Si bien es cierto que este tipo de rechazos va disminuyendo paulatinamente. Es la segunda de las características anteriores la que se muestra más crítica en las aplicaciones del reconocimiento del habla. El estado actual de la investigación en reconocimiento del habla nos muestra excelentes resultados de sistemas trabajando en entornos controlados de laboratorio. Sin embargo, una aplicación real de esta tecnología exige un funcionamiento en el mundo real donde el grado de dificultad de los problemas es un orden de magnitud mayor.

Bajo esa premisa de buscar una aplicación real, el modelo genérico de comunicación que el reconocimiento del habla propone para el diálogo hombre-máquina puede representarse, de forma simplificada, tal y como muestra el diagrama de la figura 41, para un caso de acceso a una base de datos.

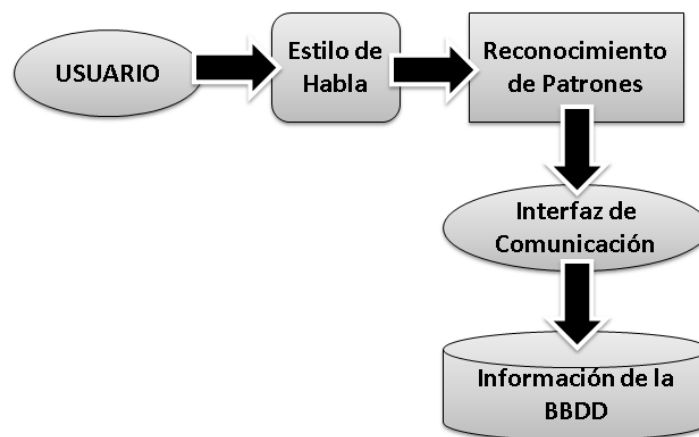


Figura 41. Modelo genérico de comunicación para Reconocimiento del Habla.

En este diagrama, el acceso a la información contenida en una base de datos comienza con la producción de un mensaje hablado por el usuario, pero utilizando una forma o estilo de habla restringido; por ejemplo, utilizando palabras de un vocabulario reducido pronunciadas de forma aislada (como los dígitos), frases tipo, etc. A partir de la señal de voz, un proceso de clasificación, basado en reconocimiento de patrones asociados a diferentes unidades lingüísticas (palabras, fonemas, sílabas, etc.), permite

a una interfaz de comunicaciones extraer de la base de datos la información solicitada por el usuario.[66]

A continuación se presentarán las principales áreas de trabajo que intervienen en el diseño y especificación de sistemas de Reconocimiento del Habla actuales, que **serían** las siguientes:

- 1) Procesado de la señal de voz.
- 2) Técnicas de reconocimiento de patrones.
- 3) Diferentes estilos de habla.
- 4) Dependencia del locutor.
- 5) Vocabulario de reconocimiento.
- 6) Tarea de reconocimiento.

7.5.1. Procesado de la señal de voz

La primera operación que debe realizar un reconocedor es procesar la señal de voz de entrada al sistema, con objeto de extraer la información acústica relevante para la tarea a realizar. En este primer nivel del sistema son dos los interrogantes a resolver:

- ¿Qué rasgos o características extraer?
- ¿Qué efectos perturbadores pueden acompañar a la voz? y ¿cómo eliminarlos?

La respuesta a la primera cuestión ha venido precedida de un largo proceso de investigación sobre diferentes procedimientos de parametrización de la voz. Planteándose como la solución actual más extendida una parametrización de la envolvente espectral que incluya consideraciones preceptuales a partir del funcionamiento del oído. Para reducir el número de parámetros posibles, la parametrización se combina con la utilización de técnicas discriminativas, seleccionándose el subconjunto con los parámetros más eficientes o distintivos.

- 1) En cuanto a la segunda de las preguntas planteadas, la presencia de efectos perturbadores en la señal de entrada, ha generado tres líneas de trabajo principales:

- 2) Detección robusta de voz: Apareciendo innumerables procedimientos de discriminación entre voz o ruido (silencio) para diferentes tipos de ruido.
- 3) Reducción de ruido: Distinguiéndose procedimientos que actúan directamente sobre la señal de voz y procedimientos que buscan compensar el efecto del ruido sobre la parametrización de la voz.

Cancelación de ecos: Incorporando técnicas de filtrado adaptativo que permitan al usuario comenzar a hablar mientras, desde el terminal remoto, se le está comunicando un mensaje que puede provocar un eco en la voz que entra al reconocedor.[67]

7.5.2. Técnicas de reconocimiento de patrones

El reconocimiento de patrones es la técnica más específica de todo sistema de reconocimiento. De ahí que muchos reconocedores se identifiquen a partir de la técnica de reconocimiento de patrones que incorporan. A partir de la representación paramétrica de la voz, este módulo realiza un proceso de clasificación utilizando una serie de patrones. Estos patrones se obtienen en una fase de entrenamiento del sistema y son representativos de un conjunto de unidades lingüísticas (palabras, sílabas, sonidos, fonemas). La peculiaridad más característica de este proceso, que marca su dificultad, es la variabilidad temporal que puede presentar una misma unidad lingüística al ser producida por diferentes modos y/o velocidades de habla. Así pues, las primeras técnicas de reconocimiento de patrones utilizadas fueron las basadas en un Alineamiento Temporal a través de algoritmos de Programación Dinámica, técnicas DTW. Posteriormente se recurrió a la mayor flexibilidad que el modelado de procesos estocásticos permite para representar secuencias de duración variable. Concretamente la alternativa a las técnicas DTW fueron los Modelos Ocultos de Markov, (HMM), que pueden verse como una generalización de algoritmos DTW y han demostrado mejores prestaciones en multitud de sistemas de reconocimiento. También hay que mencionar que, recientemente, la potencia y excelentes capacidades de clasificación mostradas por las denominadas Redes Neuronales Artificiales (RN) las sitúa como posible alternativa frente a los HMM. Hasta el momento las Redes Neuronales han permitido obtener los mejores resultados en Reconocimiento de Locutores, sin embargo en Reconocimiento del Habla encuentran como mayor dificultad la forma de afrontar la variabilidad temporal del habla.

7.5.3. Modelado dependiente del estilo de habla

Se distinguen tres modos fundamentales de hablar frente a un sistema de reconocimiento:

- 1) Palabras aisladas. Supone que el usuario pronuncia una sola palabra o comando que el sistema deberá reconocer.
- 2) Habla conectada. El usuario pronuncia de forma fluida un mensaje utilizando un vocabulario muy restringido; el ejemplo más típico sería la pronunciación de un número telefónico.
- 3) Habla continua. Corresponde al modo más avanzado de funcionamiento de un reconocedor, y supone la pronunciación de frases de forma natural para un vocabulario amplio de palabras.

Además de los tres modos fundamentales anteriores, los reconocedores de voz tienen que afrontar, para un modelado robusto del habla, los tres aspectos siguientes:[68]

- 1) Reconocimiento en contexto o "word spotting". Técnica especialmente utilizada en reconocimiento de palabras aisladas, encaminada a detectar la presencia de palabras del vocabulario a reconocer en el contexto de otras palabras o pronunciaciones. La mayoría de las veces el contexto es resultado de la dificultad que encuentra el usuario para ceñirse a la pronunciación de una única palabra aislada. En otras ocasiones, el reconocimiento en contexto es la solución apropiada para robustecer el reconocimiento en ambientes acústicamente hostiles; por ejemplo, cuando la palabra que pronuncia el usuario viene acompañada de ruidos telefónicos, urbanos, etc. En cualquier caso, se trata de una técnica importante para robustecer los sistemas en aplicaciones reales.
- 2) Rechazo. Otro efecto de la presencia de sonidos indeseados (ruidos, sonidos o palabras fuera del vocabulario), es provocar el reconocimiento de palabras que realmente no han sido pronunciadas. Los procedimientos conocidos como técnicas de rechazo tienen como objetivo permitir incluir entre los resultados de reconocimiento la identificación de esos sonidos indeseados. Nos encontramos ante un

problema de gran importancia de cara a la operatividad de un sistema de reconocimiento, que aún hoy por hoy no cuenta con una clara solución.

- 3) Múltiples candidatos. El proceso de reconocimiento de patrones que realiza un reconocedor se basa en identificar el patrón que ofrezca la puntuación más alta para decidir cuál es la mejor palabra o secuencia de palabras reconocida. Este proceso se basa en información exclusivamente acústica, sin tener en consideración otras posibles fuentes de conocimiento que podrían utilizarse para completar las puntuaciones de las diferentes palabras o secuencias candidatas. En la mayoría de los casos, la aplicación en que se encuentra el reconocedor es la que posee la información necesaria que permitiría seleccionar entre varias hipótesis de reconocimiento. Pensemos, por ejemplo, en una aplicación basada en el reconocimiento de números telefónicos; en esa situación, ante las dos hipótesis mejores de reconocimiento, una compuesta de cinco dígitos y otra de siete, la aplicación seleccionaría esta última independientemente de quién obtuviese la mayor puntuación "acústica" en el proceso de clasificación. Los procedimientos que permiten a un reconocedor disponer de la flexibilidad que supone manejar N hipótesis de reconocimiento se denominan N -best.

7.5.4. Dependencia del locutor

El grado de dependencia del locutor define si el sistema incorpora patrones de unidades lingüísticas adaptados a un locutor determinado, y, por tanto, sólo funcionará correctamente para él, o si los patrones pretenden ser válidos para cualquier hablante. En el primer caso se habla de reconocimiento dependiente del locutor, mientras que en el segundo de reconocimiento independiente del locutor. A parte de las actividades específicas que se desarrollan para sistemas dependientes e independientes del locutor, existe un importante número de esfuerzos dirigidos a conseguir la adaptación de un reconocedor a un locutor específico con la menor cantidad de voz posible.

7.5.5. Dependencia del vocabulario

Las prestaciones de un reconocedor dependen fuertemente del tamaño y grado de dificultad del vocabulario. Es decir, del número de palabras que el sistema es capaz de reconocer, y de la mayor o menor dificultad de su reconocimiento en base a las relaciones de similitud fonética entre palabras. En la actualidad se diseñan sistemas tanto para vocabularios pequeños (menos de 50 palabras) y medios (entre 50 y 500 palabras), como para grandes vocabularios (más de 500 palabras), llegándose hasta 50.000 palabras para aplicaciones de dictado o acceso a bases de datos mediante lenguaje natural.[69]

Otra importante dimensión, en relación con el vocabulario, es la que afecta a la distinción entre vocabularios fijos y flexibles. Una determinada aplicación, cuando esté reconociendo, siempre actuará sobre un vocabulario fijo. Pero en muchos casos ese vocabulario deberá variarse o actualizarse para eliminar y/o dar cabida a nuevas palabras. Tradicionalmente, una variación del vocabulario suponía comenzar un largo y costoso proceso de recogida de una nueva base de datos y re-entrenamiento de los patrones del sistema. En la actualidad hay diversas aproximaciones para conseguir un sistema con vocabulario flexible, que no necesite re-entrenarse para cada nuevo vocabulario.

7.5.6. Gramáticas de reconocimiento

Según aumenta el número de palabras del vocabulario, el número de posibles combinaciones crece exponencialmente. Por tanto, se hace imprescindible la incorporación de restricciones, en cuanto al número de combinaciones válidas, según la tarea en que se inserte el sistema. Restricciones que suelen incorporarse en forma de gramáticas basadas en reglas sintácticas y/o semánticas destinadas a reducir el número de palabras susceptibles de ser reconocidas en cada momento. La medida utilizada para definir el grado de dificultad que supone una determinada tarea es la denominada perplejidad, de modo que un nivel de perplejidad bajo supone que en cada momento el número de posibles palabras candidatas es bajo, mientras que una perplejidad alta supone que ese número es alto, y consiguientemente el reconocimiento será más difícil.

7.6. Técnicas de diseño para un sistema de reconocimiento de voz

Se van a estudiar a continuación cuatro técnicas distintas que se utilizan o se han utilizado para el diseño de reconocedores de habla. De ahora en adelante denominaremos "palabra" a la unidad básica en la que se base el reconocedor (en la realidad pueden ser sílabas, demisílabas, fonemas, morfemas, palabras, conjuntos de palabras etc.). Las técnicas son:

- Técnicas topológicas: Dynamic Time Warping (DTW), basado en el cálculo y comparación de distancias.
- Técnicas probabilísticas: Modelos ocultos de Markov (HMM), que son modelos generativos de las palabras del vocabulario.
- Redes neuronales.
- Sistemas basados en el conocimiento: reconocedores por reglas o sistemas expertos.

En los cuatro casos se puede hablar de una fase de "entrenamiento" (cálculo de los patrones de referencia, cálculo de los parámetros de los modelos de Markov, entrenamiento de las redes neuronales o creación de estructuras de datos para los sistemas expertos) y de otra fase de "reconocimiento" propiamente dicho. Y también en los cuatro casos el primer proceso necesario es la "parametrización" o transformación de la forma de onda de la señal entrante en un conjunto de parámetros o características adecuadas a cada reconocedor.

7.6.1. Dynamic Time Warping

Los reconocedores de habla basados en técnicas de Dynamic Time Warping (DTW) han sido los primeros que han alcanzado un nivel de fiabilidad suficientemente alto como para dar lugar al desarrollo de productos comerciales.

Los sistemas de reconocimiento basados en DTW funcionan de la siguiente manera: Primero se parametriza la señal de voz a reconocer; para ello se divide en pequeñas ventanas de análisis (unos 20 msec), y sobre cada una de esas ventanas se realiza un proceso de análisis que extrae un conjunto de parámetros (que pueden ser acústicos o coeficientes espectrales). Ese conjunto o vector de parámetros se puede

ver como un punto en un espacio n -dimensional. El conjunto de todas las ventanas de análisis se convertirá así en una secuencia de puntos en ese espacio, y esa secuencia de puntos es lo que se llama "patrón" o "plantilla".[70]

El sistema reconocedor dispone de un conjunto de patrones de "referencia" que se han calculado en la fase de entrenamiento, y que representan al conjunto de palabras del vocabulario que el sistema puede reconocer. De esta forma, una vez obtenida la plantilla de la palabra, la tarea del reconocedor consiste en compararla con todos los patrones de referencia que el sistema tiene, calculando la "distancia" que la separa de las referencias, y elegir como palabra reconocida aquella cuya plantilla de referencia dé la menor distancia en la comparación.

7.6.2. Modelos ocultos de Markov

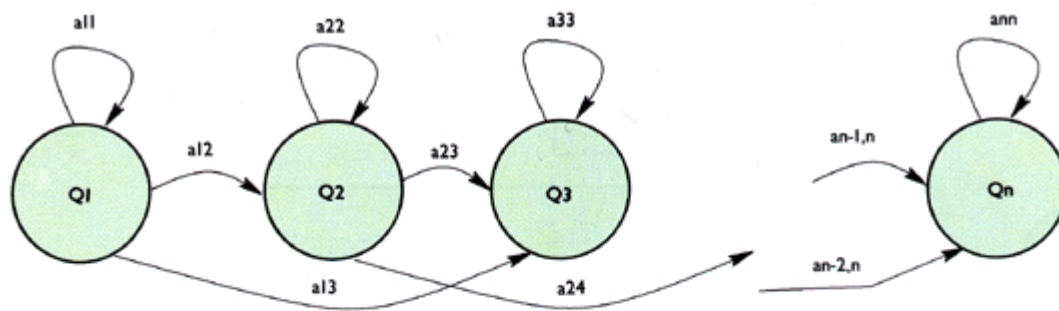
Otro enfoque alternativo al de medir distancias entre patrones (enfoque topográfico) es el de adoptar un modelo estadístico (paramétrico) para cada una de las palabras del vocabulario de reconocimiento, como son los modelos ocultos de Markov (HMM, del inglés 'Hidden Markov Models').

Estos sistemas han sido posteriores en el tiempo, y hoy día la mayoría de los reconocedores en funcionamiento se basan en esta técnica estadística, ya que aunque sus prestaciones son similares a las de los sistemas basados en DTW, requieren menos memoria física y ofrecen un mejor tiempo de respuesta. Tienen como contrapartida una fase de entrenamiento mucho más lenta y costosa, pero como esta tarea se realiza una única vez, y se lleva a cabo en los laboratorios. Es un precio que parece valer la pena pagar.

Un HMM se puede ver como una máquina de estados finitos en que el siguiente estado depende únicamente del estado actual, y asociado a cada transición entre estados se produce un vector de observaciones o parámetros (correspondiente a un punto del espacio n -dimensional del que se hablaba en el apartado anterior). Se puede así decir que un modelo de Markov lleva asociados dos procesos: uno oculto (no observable directamente) correspondiente a las transiciones entre estados, y otro observable (y directamente relacionado con el primero), cuyas realizaciones son los vectores de parámetros que se producen desde cada estado y que forman la plantilla a reconocer.

Para aplicar la teoría de los HMM en reconocimiento de voz, se representa cada palabra del vocabulario del reconocedor con un modelo generativo (que se calculará en la fase de entrenamiento) y posteriormente, se calcula la probabilidad de que la palabra a reconocer haya sido producida por cada uno de los modelos de la base de datos del reconocedor. Para ello, se asume que durante la pronunciación de una palabra, el aparato fonador puede adoptar sólo un número (finito) de configuraciones articulatorias (o estados), y que desde cada uno de esos estados se producen uno o varios vectores de observación (puntos de la plantilla), cuyas características espectrales dependerán (probabilísticamente) del estado en el que se hayan generado. Así vista la generación de la palabra, las características espectrales de cada fragmento de señal dependen del estado activo en cada instante, y la evolución del espectro de la señal durante la pronunciación de una palabra depende de la ley de transición entre estados.

La representación más usual de un HMM es la utilizada para máquinas de estados finitos, es decir, conjuntos de nodos (que representan a los estados) y arcos (transiciones permitidas entre los estados). Un tipo de HMMs especialmente apropiado para reconocimiento de voz son los modelos "de izquierda a derecha"; modelos en los que una vez que se ha abandonado un estado, ya no se puede volver a él. La figura 42 representa un modelo con 'n' estados en el que desde cada estado sólo se permiten tres tipos de transición: al propio estado, al estado vecino y a dos estados más allá (este tipo de saltos que da recogido en una matriz de transiciones tridiagonal).



MODELO DE MARKOV

- 'n' estados
- primera observación desde el estado 1; última desde el estado 'n'
- matriz 'A' de probabilidades de transición:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & \dots & b_{1R} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & \dots & b_{2R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & b_{n4} & \dots & b_{nR} \end{pmatrix}$$
- matriz 'B' de probabilidad de ocurrencia de las observaciones desde cada estado

Figura 42. Representación de modelo de Markov

Las fases que se deben ir cumpliendo para la resolución de un HMM son las siguientes, no daremos detalle de ellas, por la complejidad y extensión que conllevaría su análisis.

- 1). Definición formal de un hmm
- 2). Reconocedor de palabras basado en hmms
- 3). Entrenamiento de un hmm
- 4). Descripción del Algoritmo de Viterbi
- 5). Etapa de reconocimiento
- 6). Inclusión de modelos duracionales

7.6.3. Redes neuronales

Los modelos computacionales basados en redes neuronales surgieron hace ya relativamente bastante tiempo, pero se abandonó su estudio por no disponer de algoritmos eficientes de entrenamiento. Ahora ya no existe esa dificultad, y se ha demostrado ampliamente su enorme potencia computacional.

Los sistemas de reconocimiento basados en redes neuronales pretenden, interconectando un conjunto de unidades de proceso (o neuronas) en paralelo (de forma similar que en la mente humana), obtener prestaciones de reconocimiento similares a las humanas, tanto en tiempo de respuesta como en tasa de error. Esa forma de interconexión de las unidades de proceso es especialmente útil en aplicaciones que requieren una gran potencia de cálculo para evaluar varias hipótesis en paralelo, como sucede en los problemas de reconocimiento de voz.

Las unidades de proceso pueden ser de varios tipos; las más simples (y utilizadas) disponen de varias entradas, y la salida es el resultado de aplicar alguna transformación no lineal a la combinación lineal de todas las entradas. Otro tipo de neuronas un poco más elaborado se caracteriza por disponer de memoria; en ellas la salida en cada momento depende de entradas anteriores en el tiempo.

La forma en que las neuronas se conectan entre sí define la topología de la red, y se puede decir que el tipo de problemas que una red neuronal particular soluciona de forma eficiente, depende de la topología de la red, del tipo de neuronas que la forman, y la forma concreta en que se entrena la red.

Al igual que para las técnicas anteriores descritas, una red neural debe ser entrenada para resolver un tipo determinado de problemas. El algoritmo particular de entrenamiento dependerá de la estructura interna de las neuronas, pero, en cualquier caso, el entrenamiento se llevará a cabo a partir de una base de datos etiquetada, como sucedía con los modelos de Markov, y será un proceso iterativo en el que se modifican los parámetros de la red para que ante un conjunto determinado de estímulos (plantillas), produzca una respuesta determinada: la palabra del vocabulario representada por esas plantillas

La red neural que mejores resultados está dando hasta este momento en reconocimiento automático del habla es la denominada "perceptrón multicapa". La

figura 43 muestra su topología: las neuronas se disponen por "capas"; hay una capa de entrada, que opera directamente sobre los vectores de observación o puntos de las plantillas, una capa de salida que apunta la palabra reconocida, y una o más capas intermedias. Cada capa está compuesta por varias unidades de proceso, que se conectan con la siguiente capa por una serie de enlaces a los que se da un cierto peso específico w_{ij}

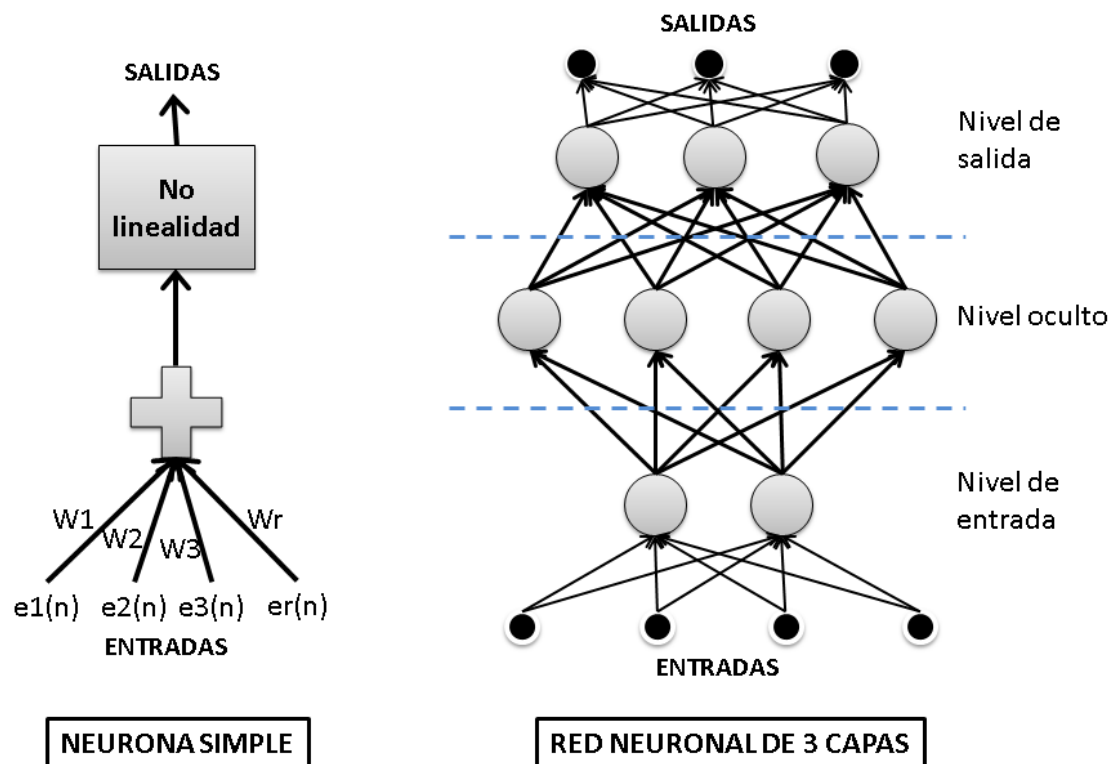


Figura 43. Redes Neuronales

El conjunto de vectores de características entra en la capa de neuronas de entrada, y posteriormente es propagado a las capas siguientes. En cada célula de proceso se calcula la suma ponderada (por los pesos w_{ij}) de las señales de entrada, y posteriormente se procesa en la neurona con su sistema no lineal. Si el resultado de esta operación supera un cierto umbral, la neurona reacciona, transmitiendo señal a las neuronas siguientes de la capa superior.

En la fase de entrenamiento, dada una entrada conocida (p.ej. un conjunto de vectores que representa el dígito 1), la salida de la red es comparada con la salida esperada (y conocida de antemano), calculándose un error. Ese error se propaga hacia abajo, ajustándose de esta manera los pesos de las conexiones entre neuronas.

Efectuándose este proceso varias veces se consigue que la red "aprenda" que respuesta debe dar para cada entrada en la fase de reconocimiento.

7.6.4. Reconocimiento basado en el conocimiento

Los métodos de reconocimiento descritos hasta ahora funcionan bastante bien cuando se trata de reconocer palabras aisladas. Cuando el sistema debe reconocer frases o habla continua, es necesario acudir a otras fuentes de conocimiento además de las puramente matemáticas y acústicas. Estas son por lo general reglas de tipo lingüístico, como se verá a continuación. Con este tipo de sistemas se llegará a tener no solo un reconocedor de habla sino un sistema de "comprensión" de habla.

La razón por la que a estos sistemas avanzados de reconocimiento se les llama sistemas basados en el conocimiento, se debe al uso de otras fuentes, otras disciplinas, otros conocimientos para llegar al entendimiento de la frase. En definitiva, de lo que se trata es que una máquina llegue a tener y utilizar los conocimientos que tiene una persona humana, para entender un mensaje.[71]

7.7. Módulos de un sistema de reconocimiento

A continuación se describen los distintos niveles, o módulos básicos en que se podría subdividir un Sistema de Reconocimiento basado en el conocimiento.

7.7.1. Módulo de procesamiento acústico

En este módulo se extraen, a partir de la forma de onda de la señal de voz, un conjunto de parámetros representativos de la misma, que luego serán tratados en módulos posteriores. Para el cálculo de esos parámetros, se realiza un proceso de segmentación de la señal de entrada en pequeñas ventanas de análisis, y para cada una de las ventanas resultantes se calcula ese conjunto de parámetros, que pueden ser desde valores de la frecuencia fundamental, energía, densidad de cruces por cero y posición de los formantes, hasta otros parámetros que aporten información útil para comprender el sentido de la frase, como la variación de la frecuencia fundamental, la duración de los alófonos, etc.

7.7.2. Módulo de análisis fonético

Calcula, a partir de los parámetros obtenidos en el módulo anterior, la representación fonética más probable (o el conjunto de las más probables) correspondiente a la señal de voz. Esta transformación se basa en un proceso de etiquetado de los segmentos de análisis en que se divide la frase pronunciada, asignando a cada tramo de voz una unidad lingüística abstracta, como pueden ser los alófonos. La ventaja de utilizar estas unidades para el siguiente tratamiento es que el número de datos a manejar es mucho menor, y además, debido a su naturaleza fonética, presentan una correspondencia bastante fuerte con la representación léxica.

7.7.3. Módulo de análisis fonológico

El área de la fonología estudia la estructura o función de los sonidos dentro del lenguaje. El conocimiento fonológico permite la adaptación de los datos obtenidos en los niveles anteriores a una determinada lengua. Es necesario definir cuáles son las unidades fonológicas que van a ser reconocidas en el Sistema de Reconocimiento: pueden ser alófonos, fonemas, difonemas, sílabas, palabras, etc. Estas unidades abstractas del lenguaje son estudiadas por separado y dentro de una secuencia para cada lengua en concreto.

Las reglas fonológicas aportan información de cómo varia la pronunciación de los fonemas, dependiendo del contexto. Con estas reglas se mejora o complementa la salida del Procesador Acústico-Fonético.

Para la realización de estas reglas, y un ajuste correcto de los parámetros, es necesario tener en cuenta la Prosodia de la frase. Los valores de los parámetros obtenidos en el análisis acústico-fonético ayudarán a determinar las sílabas tónicas o átonas, si la frase es enunciativa o interrogativa, etc.

7.7.4. Módulo de análisis morfológico

Es importante conocer, para cada lenguaje, las reglas de formación de las palabras a partir de los morfemas elementales. Esta es una de las facetas que estudia la morfología. Por ejemplo, hay combinaciones de sonidos o de letras que están permitidas en unos lenguajes y en otros no, por lo que es necesario conocer esas reglas de formación específicas. También hay reglas de formación de palabras a base

de utilizar prefijos o sufijos. La disponibilidad de estas reglas, o incluso de un diccionario, ayudará a la determinación de palabras dentro de la cadena de unidades fonéticas que han salido del módulo acústico fonético.

Las reglas morfológicas ayudan también a la categorización gramatical de las palabras, lo que podrá ser usado por otros módulos.

7.7.5. Módulo de análisis sintáctico

La sintaxis estudia cómo combinar las palabras para construir frases de forma correcta en un determinado lenguaje. En cada idioma existe una serie de reglas de concatenación de palabras, constituyendo la Gramática del Lenguaje.

Un ejemplo de frase sintácticamente correcta sería: "El perro come la manzana". Un ejemplo de frase sintácticamente incorrecta sería: "Él come manzana perro la".

Un sistema de reconocimiento que conozca y aplique las reglas de la sintaxis, ayudara bastante a decidir una secuencia lógica de palabras, y en caso de dudas entre los módulos anteriores, elegirá aquella que sintácticamente sea correcta.

Si un sistema debe reconocer una frase como "Los perros corren por el campo", ha podido tener dudas si "perros" va en singular o plural, dado que la terminación de la palabra es difícil de reconocer por el sistema y quizás el locutor no la ha vocalizado muy bien. Sin embargo, si ha reconocido con bastante seguridad el artículo previo "Los", estará totalmente seguro que la palabra siguiente es "perros".

7.7.6. Módulo de análisis semántico

El conocimiento semántico está relacionado con cómo se encadenan las palabras para dar significado a una frase. Toma como punto de partida el significado individual de las palabras, para deducir si una frase determinada tiene o no significado.

Una frase correcta desde el punto de vista semántico sería: "El pájaro está en el árbol". Sin embargo, la frase "El árbol está en el pájaro" es semánticamente incorrecta. Obsérvese que esta última frase es correcta sintácticamente.

En este módulo y los siguientes es donde empiezan los grandes retos para dar respuesta a los graves problemas de reconocimiento, ya que no se dispone aún de una forma eficiente de introducir este conocimiento en las máquinas.

Piénsese que hay muchas frases o palabras que tienen significado en un contexto y no lo tienen en otro, o lo tienen pero diferente. Esto es mucho más acusado en el lenguaje coloquial. Si por ejemplo se dice la frase "El pájaro estaba leyendo un libro", a nadie se le puede ocurrir que un pájaro pueda leer. Sin embargo si "El pájaro" es una denominación peyorativa de una persona, sí que tendría sentido. ¿Cómo puede distinguir una máquina una opción de la otra?

7.7.7. Módulo de análisis pragmático

El nivel de conocimiento pragmático está relacionado con el contexto donde se están desarrollando las ideas.

Si se hubiera encabezado este artículo con la frase " La lluvia en Sevilla es una maravilla", nadie sabría la relación con el contenido del artículo. Sin embargo una frase como "El hablar con los ordenadores es un sueño que algún día se hará realidad", está relacionada con el tema del que luego se habla. La primera tiene un contenido sintáctico y semántico correctos, pero pragmáticamente está fuera de contexto. No así la segunda. La utilización de este conocimiento está muy relacionado con el módulo de análisis semántico.

Puede darse el caso en que frases, sintácticamente mal formadas, tengan un contenido pragmático correcto. Esto es necesario tenerlo en cuenta, sobre todo en el contexto en que estamos de los Reconocedores de Habla, ya que sucede más veces en el lenguaje hablado que en el escrito.

7.7.8. Módulo de análisis del conocimiento del mundo

Este apartado incluye el conocimiento general que debe tener el usuario del lenguaje, con vistas, por ejemplo a mantener una conversación. Es necesario que se conozca el nivel de conocimientos del interlocutor en el tema de que se hable para que haya una transmisión de ideas.

Es totalmente ilógico que un premio Nóbel de medicina de una charla de bioquímica a un grupo no familiarizado con el tema de niños de primaria utilizando un lenguaje totalmente técnico. Aunque todas las frases sean sintáctica, semántica y pragmáticamente correctas no habrá transmisión de ideas.

Dentro del tratamiento del lenguaje en los reconocedores de habla se puede utilizar para descartar hipótesis de palabras reconocidas, que por su complejidad técnica, estén fuera del alcance de la persona que está utilizando el reconocedor, o para incluirla si la situación es la contraria.

7.7.9. Estructura del sistema de reconocimiento

La forma en que todas las fuentes de conocimiento que se han revisado se integran en el sistema reconocedor es un factor que influye decisivamente en la dificultad de implementación del sistema experto, y también en sus prestaciones finales.

La forma más simple de organizar todas esas estructuras de datos es de forma jerárquica, dividiendo el trabajo entre varios bloques de proceso concatenados, cada uno de los cuales tiene como entrada la salida del procesador anterior en la cadena. Así, el procesador acústico-fonético analizando la forma de onda produce varias secuencias de fonemas, cada una de ellas correspondiente con un grado de probabilidad determinado a la transcripción fonética de la señal de entrada al sistema. El procesador morfológico genera una red con las palabras más probables, y esa red pasa al procesador sintáctico, que la depura y recorta, dejando sólo las secuencias de palabras gramaticalmente correctas. El procesador semántico sigue limpiando esa red, eliminando las frases sin sentido. Por último, y en el supuesto caso de que quede más de un candidato, será el procesador pragmático quien tome la última decisión.

Ese sistema de organización permite el flujo de información en un único sentido, sin ningún tipo de realimentación que pueda aumentar la eficiencia del sistema. Se puede pensar en aprovechar, por ejemplo, la información del procesador pragmático (modulada por informaciones de tipo sintáctico y semántico) para disminuir el número de posibilidades que los procesadores acústico-fonético y morfológico tienen que explorar. Este tipo de flujo "inverso" de información sin duda aumentará el tiempo de respuesta del sistema, así como la tasa de reconocimiento. La figura 44 muestra una estructura de interconexión que refleja esta idea.

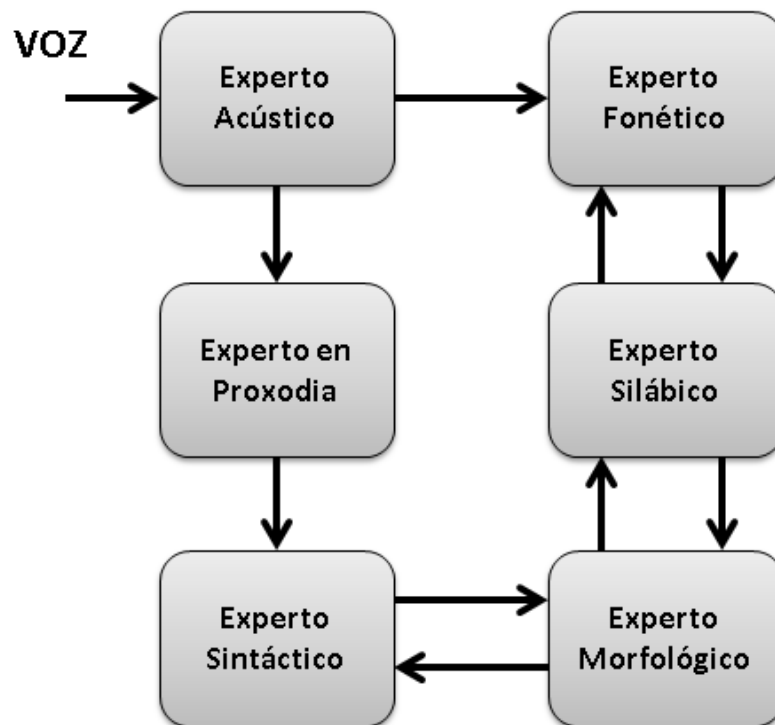


Figura 44. Modelo circular

Otra organización diferente conectaría a todos los procesadores con cada uno de los demás utilizando el recurso de memoria compartida (por ejemplo). Esto queda reflejado en la figura 45. Es una estructura de más complicada implementación y mucho más versátil que ofrece mayores posibilidades de interacción que las anteriores. Sin embargo, parece que desborda un poco las necesidades de los sistemas expertos para reconocimiento tal y como están siendo concebidos hasta el momento.

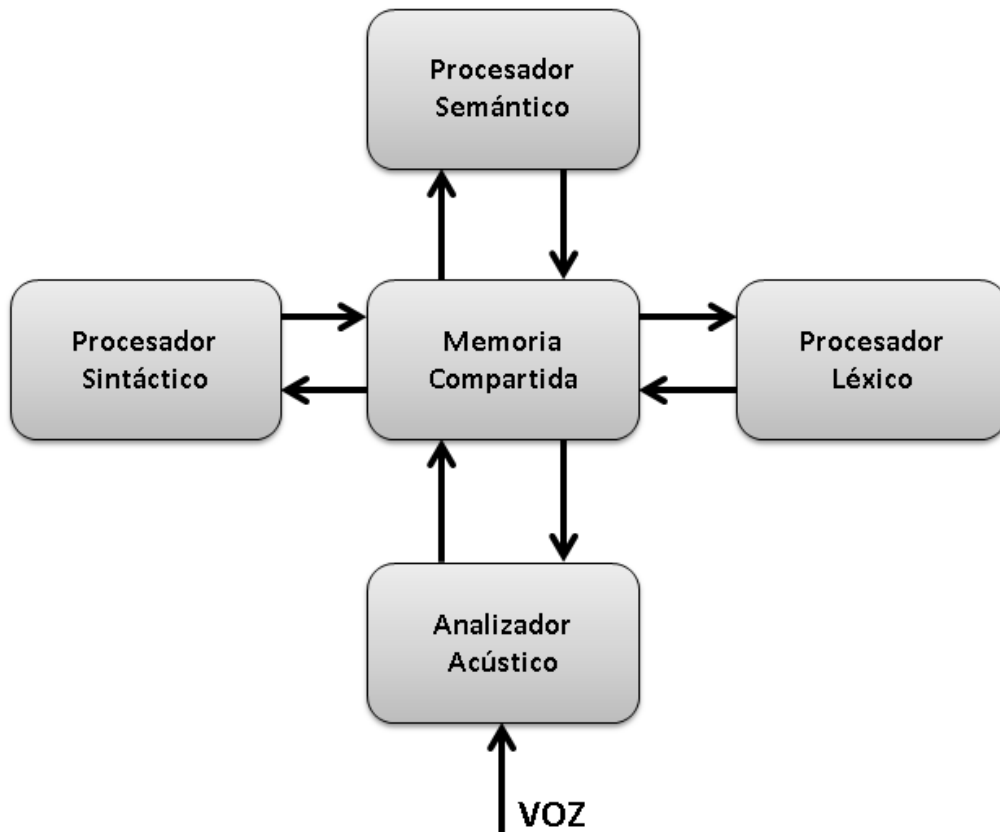


Figura 45. Modelo de memoria compartida



8

ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS ESTUDIADAS



Después de repasar los principios físicos, fisiológicos y el funcionamiento de todas las técnicas a estudio vamos a proceder a un análisis de estas. En el intentaremos compararlas para saber cuál es la técnica aventajada en cada una de las características que tiene que denominar un sistema de identificación biométrica.

Para ello nos basaremos en un las características aportadas por Davide Maltoni, que aporta siete para dar una valoración global de cada técnica. La elección del rasgo o rasgos biométricos que debe manejar un sistema automático de reconocimiento se efectúa teniendo en cuenta el cumplimiento en mayor o menor grado de las siguientes propiedades:

- **Universalidad:** el rasgo biométrico existe para todos los individuos.
- **Unicidad:** el rasgo identifica unívocamente a cada individuo.
- **Permanencia:** el rasgo se mantiene invariable con el tiempo a corto plazo.
- **Mensurabilidad:** el rasgo es apto para ser caracterizado cuantitativamente.
- **Rendimiento:** el rasgo permite el reconocimiento de un individuo con rapidez, robustez y precisión.
- **Aceptabilidad:** el rasgo presenta la calidad de ser aceptado por la mayoría de la población.
- **Invulnerabilidad:** el rasgo permite una robustez del sistema frente a los métodos de acceso fraudulentos.

El mayor riesgo que se da en un sistema biométrico es la suplantación de la identidad del individuo mediante la imitación (por ejemplo, la voz o la firma manuscrita) o la reproducción (generación fraudulenta de la imagen de la huella dactilar o el iris) del rasgo a reconocer.

Para ahondar más en cada uno de ellos serán estudiados en capítulos separados, uniendo las conclusiones más adelante con una comparativa detallada.

8.1. Universalidad

Tal y como se describió anteriormente, este factor mide cualitativamente, la posibilidad de extraer las características de un individuo, necesarias para el buen funcionamiento del sistema.

Continuando el orden de nuestro estudio, comenzando a hablar por el ADN, en términos estrictos su universalidad posiblemente sea la más alta. Todos los seres humanos tienen un ADN distinto al de sus congéneres, muy similar pero siempre característico para cada individuo, lo que nos permite afirmar que dos seres humanos jamás podrán tener las mismas características de ADN. Pero para darnos cuenta de la universalidad del código genético, también podemos afirmar que es compartido por todos los organismos conocidos, incluyendo virus y organelos, aunque pueden aparecer pequeñas diferencias. Así, por ejemplo, el codón UUU codifica el aminoácido fenilalanina tanto en bacterias como en arqueas y en eucariontes. La universalidad es tal que incluso podemos realizar análisis en personas muertas, como en los casos forenses y criminalísticos.

Poniendo en perspectiva todas las técnicas la firma escrita claramente es la que peor parada sale en el apartado de universalidad. No todas las personas están alfabetizadas, en los últimos datos publicados 60 países tienen más de un 20% de población analfabeta, en la que será complicado registrar una firma, correcta, estable y perfeccionada con el tiempo. A esto hay que sumarle la diversidad de sistemas de escritura dependiendo del idioma que practique la persona, pudiendo ser alfabetos, logogramas o silabarios.

En cuanto al reconocimiento del Iris, el nicho de población, que tiene la posibilidad de hacer uso de estos sistemas es muy amplio, dado que muy pocas personas carecen de ambos ojos a la vez, o padecen aniridia o ausencia de iris en su ojo, siendo solamente necesario tener un iris de los dos en buen estado para poder llevar a cabo tanto los procesos de identificación como el de reclutamiento. Las personas con problemas de ceguera pueden en muchos casos hacer uso de estos sistemas, aunque en otros la falta total de la zona del iris hace imposible reclutarlos. Se puede considerar por tanto, que la universalidad de los sistemas de reconocimiento biométrico basados en patrones de iris es muy alta.

Continuando por la huella dactilar aunque en su definición su universalidad es total siendo complicado que alguna persona no posea los suficientes dedos para realizar una identificación fiable, sí que en el caso de mal formaciones o poblaciones expuestas a determinados trabajos manuales sí que se puede perder la universalidad y la robustez y fiabilidad que se deriva de ella.

En cuanto a la universalidad en el reconocimiento facial, aunque tendríamos que considerarla alta, ya que todo rostro no tapado es susceptible de ser categorizado, so que tiene una baja resistencia al engaño, ya que cualquier barba, tinte, maquillaje, corte de pelo o gafas puede producir un falso positivo.

Por último la diremos que la universalidad del reconocimiento por voz es bastante alta, posiblemente no la más alta de las seis técnicas, pero sí muy alta, ya que el porcentaje de personas con problemas o dificultades severas en el habla es bastante reducido.

8.2. Unicidad

Esta es una de las principales características que debe cumplir un sistema de identificación biométrica. La unicidad, se puede considerar según lo expuesto anteriormente uno de los baluartes de este tipo de sistemas, ya que evalúa la probabilidad de que dos individuos posean las mismas características.

Como en la anterior característica podemos afirmar con rotundidad que la técnica con más capacidad de unicidad sin duda alguna es el ADN, no hay dos personas con el mismo ADN. Para sostener esta afirmación, pondremos el ejemplo más extremo que existe, el de los gemelos monocigóticos, también llamados idénticos, de los que hasta hace muy poco tiempo se creía que poseían el mismo ADN y que sus únicas diferencias derivaban de agentes medioambientales. Pues incluso en esos casos y en recientes estudios, se ha dado con un genoma diferente, lo que nos viene a decir que genéticamente hablando no hay dos personas iguales lo que marca el máximo escalón de la unicidad.

Para la firma escrita, la unicidad es otro de sus puntos débiles, ya que al no ser un rasgo físico o fisiológico sino una característica de comportamiento, no es única en su definición. La capacidad de identificación univoca, puede ser alterada, de manera

aleatoria, dos personas con firmas similares, o intencionada siendo víctima de copias o suplantaciones.

Para el caso del Iris en ese caso concreto, que dos personas tengan un mismo patrón de iris, es un factor muy poco probable, dado que este factor del ojo humano no está determinado genéticamente, lo que implica también que los dos ojos de un mismo individuo tienen patrones de iris no relacionados. La posibilidad de encontrar dos iris idénticos es de 1 entre 1078, lo que hace de estos un rasgo muy apropiado para llevar a cabo procesos de identificación biométrica. Otro aspecto relacionado con la unicidad de los patrones de iris, es la medida del grado de correlación entre los iris de ojos genéticamente idénticos. Una fuente de iris genéticamente idénticos, es la de una persona y sus dos ojos derecho e izquierdo. Este factor de alto grado de unicidad, deberá ser considerado a la hora del desarrollo y utilización del sistema de identificación, ya que la captura de la imagen del iris deberá realizarse para uno de los dos ojos de un usuario de manera específica, al no ser los patrones de ambos ojos intercambiables. La textura del iris del ojo es considerada la característica fenotípica, visible en el rostro de una persona que presenta una mayor unicidad. Como resultado del elevado nivel de unicidad que presentan las características extraídas de una imagen de iris, este tipo de sistemas presentan un grado de fiabilidad muy alto.

Las huellas dactilares tienen un origen parcialmente genético, pero no únicamente genético. Las huellas dactilares de los gemelos, que comparten el mismo código genético, tienen muchos rasgos en común, pero biométricamente se pueden distinguir, aunque hay gemelos encarcelados por un crimen cometido por su hermano. Los patrones de las huellas son el resultado de campos de fuerza elástica no lineales en competición en la capa basal de células entre la dermis y la epidermis. Pequeños cambios en la forma de cada dedo embrionario y de la futura yema del dedo conducen a grandes cambios en la forma de los pliegues de la piel.

Para el reconocimiento facial, y aunque es un rasgo fisiológico y dependiente de ciertos rasgos genéticos la unicidad es baja. Esto es debido a la capacidad de análisis, verificación y “macheo” que se pueden realizar con las técnicas actuales, en las que hay un margen de error por encima del deseable, para la diferenciación de dos caras.

En el reconocimiento de voz, se tiene un escenario similar al del reconocimiento facial, a pesar de ser un rasgo fisiológico, padece una unicidad baja. Los motivos son los mismos, no es tan raro el caso de personas con una voz tan similar que para las tecnologías actuales sea incapaz de diferenciarlos, intencionada o desintencionadamente.

8.3. Permanencia.

Al igual que en los anteriores apartados el ADN sería el ganador de este apartado, la permanencia es total, nuestro código genético permanece sin cambios desde nuestra formación en el útero materno hasta muchos años después de nuestra muerte. Momias encontradas después de miles de años, todavía tienen restos de pie, uñas o pelo, de los que se pueden extraer restos suficientes para desarrollar su genoma. Por lo tanto no solo es imperturbable a corto plazo, sino que más de 5.300 años después, como en el caso de Otzi la momia más antigua jamás descubierta, sigue teniendo restos suficientes para elaborar un mapa genético.

Mientras estás creando tu firma, de manera inconsciente y muy sutil, la firma puede presentar cambios con el tiempo y puede sufrir variaciones debido a condiciones físicas y emocionales de la personas. Debido a esto aplicas diferentes grados de presión sobre el papel, realizas giros a mayor o menor velocidad, en determinadas parte del proceso llegas a detener el trazo durante algunas fracciones de segundo e incluso inclinas de una forma característica el lápiz o bolígrafo que utilizas para firmar. Es evidente que la permanencia no es una de las ventajas de la firma escrita, que resulta cambiante en cortos espacios de tiempo y muy sensible al ambiente, estados de ánimo, lesiones, etc.

El desarrollo y aparición de las estructuras que configurarán el patrón del iris, que queda determinado durante la última etapa del desarrollo embrionario, constituye una estructura estable a lo largo de la vida, si no tenemos en cuenta posibles accidentes u operaciones quirúrgicas, si descontamos los posibles cambios en la pigmentación que no repercuten de ninguna manera en el buen funcionamiento del sistema, ya que la extracción de características se realiza en base a una imagen en escala de grises, por lo que este cambio de color no es significativo. Otra característica que proporciona una gran estabilidad al iris, es la protección y el aislamiento frente a agentes externos, gracias a su situación tras la córnea y el humor acuoso.

Fisiológicamente la huella dactilar es otra de las ganadoras en este apartado, en teoría y desde que se forman en nuestra etapa de gestación, permanecen iguales durante toda nuestra vida. Podemos afirmar que las características esenciales de las huellas dactilares no cambian con la edad, aunque estas pueden degradarse. Las crestas se degradan todo el tiempo; cortaduras y quemadas pueden oscurecer las características distintivas. El contacto continuo con químicos abrasivos o corrosivos pueden disminuir las características distintivas de las huellas dactilares.

8.4. Mensurabilidad

Comenzando por el ADN y rompiendo la tónica que ha tenido esta técnica durante los tres primeros apartados. Aunque la obtención de las muestras cada vez están evolucionando para ser más sencillas y menos invasivas, los procesos necesarios para caracterizarlos no han seguido el mismo camino y continúan siendo caros, tediosos y necesitan de un tiempo de respuesta medio, comparado con otras técnicas casi inmediatas. Para poner en contexto una caracterización de ADN en un laboratorio especializado puede tener un coste de 40€ por muestra y más de cara publica y al cliente una prueba de paternidad entre los 180 y 200€.

La mensurabilidad de la firma escrita no es intrusiva es sencilla para el usuario, el número de muestras puede ser solo de uno. La instrumentación necesaria es sencilla para obtener unos buenos resultados, bastante escáneres o tabletas digitalizadoras.

La captura del patrón de iris, es un proceso relativamente sencillo, en cuanto a las acciones requeridas por parte del usuario. Esta captura se realiza de forma no invasiva utilizando para ello una cámara de alta resolución, con una iluminación cercana al infrarrojo, aunque también se puede llevar a cabo con una cámara fotográfica convencional, una cámara fotográfica digital, o incluso mediante capturas de una cámara de vídeo.

En cuanto a la huella dactilar, los lectores electrónicos han llegado a tener costes muy bajos, de fácil instalación, con una muy fácil integración en una red de procesado y muy sencillos de mantener. Aunque con estos lectores la adquisición de una buena impresión dactilar siempre se halla sujeta a la presencia de suciedad,

cicatrices, heridas, etc. Así como muchos de los usuarios no saben colocar correctamente la huella en el lector. Necesitando muchas veces de más de una exposición y en más de una posición para la adquisición.

La verificación facial es posible con recursos de cómputo razonables y la búsqueda lo es para conjuntos almacenados de tamaño pequeño o mediano, en el rango de pocos miles de caras, y el volumen de información almacenado es fácil de acomodar con los medios actuales. A esto añadimos que el coste del hardware es bajo y la adquisición puede incluso pasar inadvertida para el usuario.

Por último el reconocimiento de voz tiene unas buenas prestaciones. Actualmente, la verificación es posible con recursos de cómputo muy bajos y el volumen de información almacenado es perfectamente aceptable con los medios de almacenamiento actuales. Al igual, de nuevo que en el punto anterior, el coste del hardware necesario es mínimo y la adquisición muy sencilla y cómoda para el usuario, teniendo que verbalizar una palabra o frase por lo que no presenta ningún proceso invasivo.

8.5. Rendimiento

El rendimiento de un sistema de reconocimiento biométrico viene definido por las tasas de acierto y error. A la hora de evaluar este aspecto de un sistema, se tienen en cuenta los cuatro ratios determinados en el apartado relativo a las Características técnicas de un sistema biométrico: FAR, FRR, FTE y EER.

Estos criterios variarán en base sobre todo al umbral de decisión definido en el módulo de comparación de diferentes patrones, y que puede ser modificado de forma que se optimice el rendimiento del sistema.

Cabe observar que la utilización de una de estas características de manera independiente para evaluar el desarrollo del sistema resultaría inútil. El objetivo buscado es encontrar unos criterios de decisión que permitan maximizar el rendimiento del sistema, reduciendo al mínimo e incluso buscando unas probabilidades de error nulas.

Después del “bache” que ha sufrido el ADN en el anterior apartado, en el que no ha podido conseguir una vez más el liderazgo, en este apartado no tiene rival en

cuanto a su fiabilidad y su alta precisión, con un mínimo porcentaje de error. En cuanto a su tasa de falsos positivos por números de muestras, lidera el apartado siendo menos de uno por cada 10 millones de muestras.

En el caso opuesto al ADN se encuentra la firma escrita, ya que es muy variante y expuesto a falsificaciones, tiene un muy bajo nivel de precisión y una elevada variación intrausuario, afectando cambios en el ambiente y hasta en el humor del propio usuario. Para cuantificar y poder realizar una comparación si el número de falsos positivos por cada mil muestras en el ADN era de 1 a 10.000.000 en la firma es de 1 por cada 50

Los sistemas de reconocimiento de iris presentan niveles de rendimiento muy elevados, pudiendo tenerse tasas de falsa aceptación muy bajas, incluso nulas, para valores de falso rechazo reducidos. El reconocimiento de iris se sitúa en un segundo lugar de fiabilidad siendo su tasa de falsos positivos de 1 por cada 131.000 muestras.

Pese a que los procedimientos relacionados con la huella dactilar poseen la potencialidad necesaria para conseguir excelentes resultados, presentan importantes dificultades debido a las deformaciones elásticas que sufren diferentes impresiones de un mismo dedo. Esto origina un método con no una alta fiabilidad. Si tuviésemos que cuantificarla como en todos los anteriores, estaríamos hablando de un falso positivo por cada quinientas muestras. Diez veces más fiabilidad que la firma escrita pero mucho menor que los procesos de ADN o iris.

Para el reconocimiento facial, varía mucho entre los diferentes sistemas 2D y 3D pero se sitúa en una fiabilidad media. El método 2D es muy sensible a las condiciones de iluminación, así como por la inclinación, rotación o elevación del rostro. El rostro de las personas varía con el tiempo y puede ser modificado por cirugías o accidentes. Cuando el número de personas es elevado, la probabilidad de encontrar dos muy semejantes es alta. En el caso del método 3D, es difícil obtener imágenes fidedignas en la fase de reconocimiento, ya que los sensores 3D tienen que estar muy bien calibrados y sincronizados para adquirir la información correctamente.

Para cerrar el rendimiento el reconocimiento de voz tiene una fiabilidad baja, semejante a la de la firma escrita. Los parámetros relacionados con el comportamiento del discurso son variables con el tiempo, debido a cambios causados por la edad, condiciones médicas, como es un resfriado común o el estado emocional. También

puede verse afectada por factores externos, como el ruido de fondo. Puede no ser apropiado para identificación de grandes grupos de personas y presenta dificultad con algunas formas de hablar. Situando todo esto en unos ratios de 1 error por cada 50 muestras, muy alejados de la fiabilidad que se exige para determinados servicios o sistemas.

8.6. Aceptabilidad

Este es un factor clave para poder concluir el éxito o fracaso de un sistema. A la hora de considerar el asunto de la privacidad y el consentimiento del usuario, es importante hacer hincapié, que el proceso de reclutamiento requiere en cualquier caso, que el usuario realice este proceso de manera voluntaria.

En primer lugar, resulta fácil conseguir una muestra de ADN de un sujeto desprevenido para utilizarla posteriormente de forma indebida, pero esto va en contra de la aceptabilidad de la técnica y del proceso. Tampoco el tiempo de respuesta para un reconocimiento automático ayuda a y no es un factor despreciable. La tecnología actual para hacer coincidir el ADN requiere de engorrosos métodos químicos (procesos húmedos), relacionados con las habilidades de un experto y no está orientado al reconocimiento en la línea de lo no invasivo. Sin olvidar cuestiones de privacidad que tienen que ser tomadas en cuenta, dado que se podría adquirir información sobre susceptibilidades de una persona a ciertas enfermedades, con el potencial abuso al que puede dar lugar. Todas estas razones nos llevan a afirmar que el ADN tiene una aceptabilidad baja.

La firma escrita lleva utilizándose como método de identificación durante muchos años, y en infinidad de momentos de nuestra vida. Por lo que su aceptabilidad teórica aparece ayudada por la aceptación histórica del método. Sin entrar a valorar sus otros argumentos es un método, sencillo, sin esfuerzo y que no deja ningún rastro más por parte de la persona, de ahí su aceptabilidad. Además la firma escrita como método de autenticación, es aceptada universalmente en operaciones gubernamentales, legales y comerciales. Por todo esto goza de buena aceptación por parte de los usuarios, gracias a su facilidad de uso.

Para el caso del Iris lo primero que hay que tener en cuenta es que una imagen realizada sin el consentimiento del usuario, saldría movida o borrosa, y no sería de

gran calidad, dificultando en exceso el proceso tanto en el reclutamiento como en el proceso de identificación. En un principio, los usuarios de este tipo de sistemas presentaban algunas dudas en su utilización, debido a las reticencias que presentan las personas a aquellas circunstancias relacionadas con sus ojos. Sin embargo el desarrollo de nuevos dispositivos de captura, así como la forma no intrusiva en la que ésta se realiza (al existir una distancia prudencial entre el sujeto y las cámaras utilizadas para tomar la imagen del iris), ha derivado en una creciente aceptación popular a la hora de utilizar estos sistemas de reconocimiento.

Cada día resulta más común para todos nosotros encontrarse que, para acceder de forma segura a muchas instalaciones y lugares de todo tipo, necesitamos usar nuestras huellas dactilares para identificarnos. Incluso en los últimos meses, Smartphone como el iPhone 5s de Apple o el Samsung Galaxy S5 llevan un sensor que captura nuestra huella dactilar y de esa forma asegura que solo nosotros podamos acceder a nuestro teléfono. Esto es una muestra de la aceptabilidad y la penetración en la sociedad que tiene esta técnica, y es que sin duda es la técnica más antigua y más extendida.

Sin la penetración que tiene la huella dactilar, otra técnica muy aceptada por su baja intrusividad es el reconocimiento facial. Y es que no requiere de esfuerzo alguno por parte de la persona, ni si quiera tiene porque saber que se está produciendo por lo que es transparente en cuanto al proceso. Deberíamos incluirlas en las técnicas de aceptabilidad alta.

Para finalizar el apartado el reconocimiento de voz también se encuadra dentro de los altamente aceptados por los usuarios. Su facilidad de uso, su poca invasividad y el constante uso que hacemos de ella, en llamadas de banca telefónica, seguros y similares hacen que esta técnica tenga una gran penetración y aceptabilidad por los usuarios.

La información recopilada mediante estos procesos, no debe ser usada en ningún caso con otro propósito diferente a la identificación o verificación de la identidad de la persona, como podría ocurrir en sistemas de vigilancia.

8.7. Invulnerabilidad

Invulnerabilidad o también conocida robustez de un sistema frente a los métodos de acceso fraudulento, es uno de las características más decisorias en la elección de un sistema de identificación. Si lo que prima es la seguridad la robustez será la característica que marque la elección.

El ADN por su unicidad, permanencia y rendimiento es un sistema con alta invulnerabilidad. Debido a que se basa en una característica univoca para cada ser humano, con una permanencia hasta después de la muerte, y con los valores de robustez más altos para todas las técnicas hacen que sea prácticamente realizar un acceso fraudulento o una copia. Aunque sí que las hay y cada día se han intentado realizar más ADN fraudulentos, esto es así ya que se ha demostrado que es posible construir una muestra de ADN que encaje con el perfil genético de una persona determinada (información que se puede adquirir en una base de datos del genoma) ya que los perfiles de ADN identifican solo mediante trece variaciones el ADN de uno respecto de otro. Con la información adecuada, se pueden crear librerías genéticas y ajustar una muestra de ADN que tenga un perfil y que encaje con la de un individuo en particular. Para luchar contra esto, se ha desarrollado un método de autenticación del ADN que permite diferenciar el ADN natural del artificial e, incluso, del ADN "contaminado" basados en el siguiente principio: un ADN sometido a amplificación carece de grupos metilo, cosa que no ocurre con el ADN verdadero, que tiene metiladas determinadas zonas. El test resulta esencial para comprobar la autenticidad del material genético.

En el caso de la firma escrita aunque la unicidad del sistema y su rendimiento no invitan a pensar en su robustez, se lleva utilizando durante mucho tiempo y los resultados siguen siendo satisfactorios con menos casos de falso positivo de los que podíamos esperar. Por lo que sin ser el más invulnerable sí que podríamos catalogarlo entre los primeros.

La robustez que presentan los sistemas de reconocimiento de iris, frente a posibles ataques en los que se intenta falsear los rasgos de entrada, es muy elevada. En un primer momento cuando la tecnología estaba en sus primeros años de desarrollo, los sistemas comerciales de reconocimiento de iris podían ser engañados mediante el uso de fotos de un iris de alta calidad impreso en papel. La tecnología se

ha ido desarrollando, para permitir diferenciar un iris vivo de otro falso, mediante el estudio de la variación del diámetro de la pupila, experimentado frente a diferentes condiciones de iluminación, en imágenes tomadas consecutivamente, gracias al uso de cámaras que permitan variar dinámicamente el nivel de luz de la imagen. Además de utilizar los cambios en el tamaño de la pupila, también se puede utilizar una iluminación en el rango de infrarrojos para determinar la presencia de un espécimen vivo. Este tipo de luz permitirá el desarrollo de técnicas que estudien el flujo sanguíneo del ojo del individuo bajo estudio. Por otro lado, la modificación de la estructura del iris mediante cirugía, resulta muy arriesgada, pudiendo provocar daños permanentes en la visión del sujeto sometido a la operación.

La huella dactilar tiene una invulnerabilidad media, ya que arrastra una robustez regular con alrededor de un falso positivo por cada 500 muestras y se le añade una alta tendencia a la falsificación y copia de patrones dactilares. Son realizables en polímeros plásticos después de haber sacado una copia de cualquier superficie en la que hayan depositado su huella. Incluso en Internet hay numerosos tutoriales para realizar falsificaciones “low cost” con las que intentar frustrar lectores y sistemas de baja precisión.

El reconocimiento facial no estará entre los vencedores de este apartado, más bien todo lo contrario, y es que varios factores atentan su vulnerabilidad. Como en el caso, que ahora estudiaremos de la identificación por voz, la aplicabilidad del reconocimiento facial en este momento no alcanza a aplicaciones de búsqueda en grandes conjuntos de “sospechosos” o accesos de alta seguridad si no va acompañada de sistemas clásicos como tarjetas o códigos personales. Los últimos intentos de aplicación a la localización de terroristas, de los cuales el más conocido es el de la policía de Florida en el aeropuerto de Tampa, han supuesto notorios fracasos. Todo esto es debido a que el método 2D es muy sensible a las condiciones de iluminación, así como por la inclinación, rotación o elevación del rostro. El rostro de las personas varía con el tiempo y puede ser modificado por cirugías o accidentes. Cuando el número de personas es elevado, la probabilidad de encontrar dos muy semejantes es alta. En el caso del método 3D, es difícil obtener imágenes fidedignas en la fase de reconocimiento, ya que los sensores 3D tienen que estar muy bien calibrados y sincronizados para adquirir la información correctamente.

Ya nombrado en este apartado, comparte algunas de las desventajas de sus antecesores, sobre todo con el reconocimiento facial, lo que los sitúa en mala posición dentro de este punto, siendo soluciones que para grandes alcances necesitan de ir refrendadas por otras. El motivo de la doble evaluación es la gran variabilidad de la voz de un mismo individuo a lo largo de periodos relativamente cortos de tiempo y a la moderada especificad de los parámetros que se extraen de ella.

8.8. Ponderación

Para resumir todos los ámbitos estudiados, se realizará una ponderación de cada una de las 6 técnicas en cada una de las características, otorgando 6 puntos a la mejor y 1 punto a la peor. De esta forma cuantitativamente podremos analizar cuáles son las técnicas más completas en los siete aspectos que definió

	ADN	Firma	Iris	Huella	Facial	Voz
Universalidad	6	1	5	4	2	3
Unicidad	6	1	4	5	3	2
Permanencia	6	2	4	5	3	1
Mensurabilidad	1	6	2	5	3	4
Rendimiento	6	1	5	3	4	2
Aceptabilidad	1	6	2	5	3	4
Invulnerabilidad	6	4	5	3	2	1
Total	32	21	27	30	20	17

Tabla. I. Valoración basada en las características de Maltoni

Puesto	Puntuación	Técnica
1º	32	ADN
2º	30	Huella Dactilar
3º	27	Reconocimiento de Iris
4º	21	Firma escrita
5º	20	Reconocimiento Facial
6º	17	Reconocimiento de Voz

Tabla. II. Ranking de técnicas

Analizando los resultados de la valoración de cada técnica en las características de Maltoni, queda el ranking que se puede ver en la tabla anterior.

El ADN se alza con el número 1, basado en su liderazgo en 5 de las 7 categorías, siendo sus puntos débiles la mensurabilidad y la aceptabilidad. Dos procesos en los que esta técnica tiene todavía que desarrollarse. La mensurabilidad posiblemente donde tenga más recorrido, ya que como se comentaba los procesos de autenticación fiables son costosos y largos, lo que impide que esta técnica se utilice en entornos donde se necesita inmediatez. La aceptabilidad es una característica muy difícil de lograr, debido a que la técnica socialmente se relaciona con la criminalística y que con la misma cantidad de muestra que pueden realizar una identificación, pueden saber información relativa a nuestras enfermedades, familias, etc. lo que no ayuda para que la población sea proclive a tomarse muestras de ADN.

Aunque sea la técnica más longeva en el segundo lugar del ranking se posiciona la huella dactilar y es que no tiene ningún tendón de Aquiles y destaca en unicidad, permanencia, mensurabilidad y aceptabilidad. No es la mejor pero sí que es cierto que su origen genético y su formación en el útero materno le proporciona una unicidad y permanencia muy altas. Destacando también su mensurabilidad, por la cantidad de sistemas desarrollados para la lectura y diferenciación de las huellas y su aceptabilidad por formar parte de la vida de las nuevas generaciones desde el primer momento lo que desarrolla un sentimiento de fiabilidad. En el rendimiento y la invulnerabilidad tiene margen de mejora puesto que desarrolla tasas de acierto muy

inferiores a algunas otras técnicas y los intentos de vulnerar el sistema con huellas falsas son accesibles casi a cualquier usuario.

En el tercer puesto se sitúa el reconocimiento de iris que tiene un comportamiento muy parecido al ADN, con sus dos puntos débiles en la aceptabilidad y la mensurabilidad. En este caso es cierto que la identificación es mucho más temprana y barata que en el caso del ADN y que no provoca tanto rechazo, aunque sí que continua siendo una técnica invasiva y por lo tanto penalizada por la población. Destaca en la invulnerabilidad, el rendimiento y la universalidad, ya que hablamos de un carácter genético, que ofrece unas buenas tasas de error y que ha evolucionado lo suficiente para descartar falsos positivos por iris no vivos, como por elementos como lentillas o similares.

En el cuarto puesto y a una distancia muy considerable de los tres primeros se encuentra la firma escrita que juega sus grandes bazas en la mensurabilidad y la aceptabilidad. Es muy fácil de tratar digitalmente, pudiendo obtener bastante información con elementos baratos, accesibles y muy extendidos y por supuesto es la más aceptada puesto que se lleva utilizando desde hace mucho tiempo en el comercio o la banca.

En el quinto lugar el reconocimiento facial no destaca por ningún aspecto, siendo una técnica que todavía tiene mucho que desarrollarse sobre todo para implementarse en sistemas con gran número de personas. Una vez que estos desarrollos sobre las técnicas de captura 2D y 3D se lleven a cabo es seguro que esta técnica subirá varios puestos en esta lista. Mientras tanto tiene la universalidad y la invulnerabilidad como puntos débiles debido a los cambios temporales que se pueden producir en la fisonomía facial de los individuos y a la poca tolerancia que tiene a los intentos de falso positivo, en el caso de apéndices falsos, complementos (gafas, gorras, etc.).

Como peor técnica en la ponderación que hemos realizado se sitúa el reconocimiento de voz. Sin tener ningún punto fuerte destaca negativamente en otras cuatro, unicidad, permanencia, rendimiento e invulnerabilidad. Las razones son claras y son los retos sobre los que tiene que evolucionar esta tecnología para alzarse como fiable. La unicidad es un déficit de la tecnología claramente ya que no es capaz de “machear” las suficientes muestras para no obtener voces de personas distintas con



resultados parecidos. En cuanto a la permanencia es un defecto inherente en el ser humano y contra el que debería anticiparse con algoritmos de envejecimiento. El rendimiento viene derivado de los otros dos factores y todos ellos más la facilidad para ejecutar falsos positivos con respuestas grabadas le dan una vulnerabilidad manifiesta.

9

CONCLUSIONES



A modo de resumen y para demostrar el cumplimiento de todos los objetivos, se repasarán uno por uno cada uno de estos aportando unas conclusiones personales.

El primero de los objetivos era conocer la historia y fundamentos de la identificación biométrica. Historia dispar para cada una de las técnicas debido a que las que menos desarrollo tecnológico requieren tienen un bagaje mucho más amplio. De esta forma las huellas dactilares, la firma o la voz, ya se utilizaban en Mesopotamia o el antiguo Egipto, para diferenciar esclavos, vasijas o niños. Grandes figuras de esta ciencia se acumularon desde finales de los siglos XVII hasta principios del XX, siendo nombre muy reseñables Malpighi, Purkinje, Bertillon, Galton y Vucetich. Durante estos más de doscientos años principalmente se desarrollaron técnicas perceptibles y medibles sin grandes avances tecnológicos, no disponibles durante esa época, desarrollándose principalmente la huella dactilar, la firma escrita

En la primera mitad del siglo XX los principales hitos no son desarrollos de las técnicas existentes sino en la implementación de grandes bases de datos acumulando datos biométricos de personas para su uso principalmente en términos civiles y criminalísticos, las principales se desarrollaron en EEUU, dándose en penitenciarías, la Marina Americana o el FBI.

En las últimas décadas del siglo pasado se precipitan debidos a los grandes avances tecnológicos, las investigaciones en técnicas con una necesidad tecnológica creciente, comenzando en la década de 1960 por el reconocimiento de voz, continuando por el iris, retina y culminando con la “mayor” característica biométrica, el descubrimiento del genoma humano a principios del siglo XXI.

El siguiente objetivo era el de ofrecer un estudio completo y ordenado de cada una de las 6 técnicas que se tratan en este Trabajo Fin de Máster. En cada una de ellas se ha estudiado su historia y evolución, siendo más notables, como ya se ha comentado, las de la huella dactilar, firma escrita y por su constante búsqueda la del ADN, en la que sin los medios que actualmente tenemos, se investigaban rasgos genéticos. También se han estudiado las bases fisiológicas y físicas de las técnicas como podían ser los pliegues de piel de las manos, la caligrafía, el aparato fonador, el globo ocular o la geometría facial.

Además y como no podía ser de otra manera en un trabajo de ámbito científico-tecnológico se han repasado todos los procesos implementados para cada una de las

técnicas. Estos procesos pueden ser de muestro, almacenamiento, procesamiento, reconocimiento, etc., siendo algunos comunes para varias técnicas. Repasando las soluciones y los gadgets tecnológicos necesarios para realizar cada uno de los procesados. Siendo estos, capitales ya que dependiendo de su naturaleza y de la tecnología utilizada condicionan el resto de procesos para la identificación biométrica

Por último y para cada técnica a estudio se ha repasado el ámbito de las aplicaciones actuales en las que se utiliza cada una de las técnicas, dando pinceladas de su aplicación comercial y el sector en el que se están utilizando mayoritariamente, civil, militar, aeronáutico, comercial, etc.

Para finalizar se realiza un análisis de cada una de las técnicas, para no entrar en opiniones o características subjetivas se analizan las siete características descritas por Davide Maltoni para cada una de las técnicas, estableciendo un ranking para cada característica y ponderándolas finalmente para obtener una clasificación de las seis técnicas estudiadas.

El ADN se alza con el número 1, basado en su liderazgo en 5 de las 7 categorías, siendo sus puntos débiles la mensurabilidad y la aceptabilidad. Dos procesos en los que esta técnica tiene todavía que desarrollarse. Aunque sea la técnica más longeva en el segundo lugar del ranking se posiciona la huella dactilar y es que no tiene ningún tendón de Aquiles y destaca en unicidad, permanencia, mensurabilidad y aceptabilidad. No es la mejor pero sí que es cierto que su origen genético y su formación en el útero materno le proporciona una unicidad y permanencia muy altas. Destacando también su mensurabilidad, por la cantidad de sistemas desarrollados para la lectura y diferenciación de las huellas y su aceptabilidad por formar parte de la vida de las nuevas generaciones desde el primer momento lo que desarrolla un sentimiento de fiabilidad. En el tercer puesto se sitúa el reconocimiento de iris que tiene un comportamiento muy parecido al ADN, con sus dos puntos débiles en la aceptabilidad y la mensurabilidad. En este caso es cierto que la identificación es mucho más temprana y barata que en el caso del ADN y que no provoca tanto rechazo, aunque sí que continua siendo una técnica invasiva y por lo tanto penalizada por la población. En el cuarto puesto y a una distancia muy considerable de los tres primeros se encuentra la firma escrita que juega sus grandes bazas en la mensurabilidad y la aceptabilidad. Es muy fácil de tratar digitalmente, pudiendo obtener bastante información con elementos baratos, accesibles y muy

extendidos y por supuesto es la más aceptada puesto que se lleva utilizando desde hace mucho tiempo en el comercio o la banca. En el quinto lugar el reconocimiento facial no destaca por ningún aspecto, siendo una técnica que todavía tiene mucho que desarrollarse sobre todo para implementarse en sistemas con gran número de personas. Como peor técnica en la ponderación que hemos realizado se sitúa el reconocimiento de voz. Sin tener ningún punto fuerte destaca negativamente en otras cuatro, unicidad, permanencia, rendimiento e invulnerabilidad.



10

BIBLIOGRAFIA



- [1] Umanick, "CUADERNOS DE BIOMETRÍA, HABLEMOS DE BIOMETRÍA", UMANICK LABS, S.L., 2012
- [2] Umanick, "Timeline de la Biometria", UMANICK LABS, S.L., Oct 2013
- [3] Raúl Sánchez Reillo, "Identificación Biométrica y su unión con las Tarjetas Inteligentes", Revista SIC, Apr 2000
- [4] Oscar E. Piro, "Breve historia del ADN, su estructura y función", Dpto. de Física e Instituto IFLP, 2012
- [5] Santiago Sánchez-Migallón Jiménez, "Capsulas". Amazon Media EU S.à r.l., May 2009
- [6] Curtis, Barnes, Schnek, Flores, "Invitación a la Biología", Editorial Médica Panamericana, 2006
- [7] Santiago Duran, "Historia del ADN. Línea el Tiempo", TimeRime.com, 2010
- [8] Eduardo Ghershman, "Funcionamiento del ADN, la historia de su descubrimiento e identificación", www.criminalistica.com.mx, 2011
- [9] Lorente J.A., "Un detective llamado ADN", Editorial Temas de Hoy, 2004
- [10] Quevedo A., "Genes en tela de juicio", Editorial Mc Graw-Hill, 1997
- [11] Reinaldo Velasco Mosquera, "La biología molecular y el ADN", Departamento de Agroindustria. Grupo de Investigación, Feb 2004
- [12] Stella Serrano de Moreno, "El aprendizaje de la lectura y la escritura como construcción activa de conocimientos", Simposio Internacional de Educación en la Diversidad, Jan 2000
- [13] Universidad de Jaén, "Firma Digital", Universidad de Jaén, 2004
- [14] Jesús González Gigosos, "Historia de la caligrafía", www.caligrafias.com, 2014
- [15] Revista Educación y Sociedad, "Tipos de Religiones", www.educaciónysociedad.org, 2010



- [16] María Lía Herreros, "Pericia Caligráfica", María Lía Herreros, 2004
- [17] Fernando López Pena, "La Prueba Pericial Caligráfica", Fernando López Pena, 2006
- [18] Pedro Alfonso Labariega Villanueva, "El Endoso. Segunda Parte", Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, Apr 2004
- [19] Francisco Viñals Carrera, Mariluz Puente Balsells, "Cómo se confecciona el Dictamen Pericial Caligráfico", Institut de Ciencies del Grafisme, 2006
- [20] Florentino Blázquez Entonado, "Sociedad de la Información y Educación", Consejería de Educación, Ciencia y Tecnología. Junta de Extremadura, 2001
- [21] Rocío Sanchiz Redondo, "Segmentación de Iris mediante contornos activos", Universidad Carlos III de Madrid, 2011
- [22] Raúl Sánchez Reillo, "Mecanismos de Autenticación Biométrica mediante tarjeta inteligente", Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación
- [23] Lucila Mercado, "El ojo y la ergonomía visual", Universidad Iberoamericana, Sep. 2005
- [24] Francisco Loayza Villar, "Atlas de Anatomía Ocular" Instituto de Oftalmología. Lima. Perú,
- [25] C.P. Anthony, G.A. Thibodeau, "Anatomía y Fisiología", Ed. McGraw Hill Interamericana, 2000
- [26] Santiago Montero R, Vázquez Bautista O., "Reconocimiento de Iris aplicando el Clasificador Asociativo de Patrones Multiclase", Instituto Tecnológico de León. México, 2013
- [27] Rafael Coomonte Belmonte, "Sistema de Reconocimiento de Personas mediante su patrón de Iris basado en la transformada wavelet", Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, May 2006

[28] Dra. Berta L. Laguna Mena, "Anatomía del Ojo", Consulta Oftalmológica Virtual Dra. Laguna http://www.e-oftalmologia.com/area_formacion/anatomia/index.html, Mar 2000.

[29] Santiago Aparicio Redondo, "Diseño y Desarrollo de un Sistema de Identificación Biométrica Basado en el Análisis Multiresolución del Patrón de Iris. Aplicación al control de accesos en entornos domóticos e inmóticos", Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I. Telecomunicación – U.P.M., Mar 2005.

[30] Javier Ortega García, Fernando Alonso Fernández, Rafael Coomonte Belmonte, "Biometría y Seguridad", Cuadernos Cátedra ISDEFE. Universidad Politécnica de Madrid, May 2008

[31] Gustavo Francisco Sanz, "Desarrollo de un sistema de reconocimiento de huella dactilar para aplicaciones Match-On-Card", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, Jul 2009

[32] Carlos Mauricio Galvis Traslaviña, "Introducción a la Biometría", <http://es.scribd.com/doc/217859635/biometria>, Feb 2007

[33] Quimica.es, "La piel", CHEMIE.DE Information Service GmbH, 2007

[34] Rubén Juste Meco, "Modulo de Identificación Biométrica Mediante Huellas Dactilares para Sistemas Empotrados", Dpto. de Ingeniería Electrónica. Universidad Carlos III de Madrid, 2010

[35] Francesc Serratosa, "Reconocimiento de las personas por la huella dactilar", Universidad Oberta de Catalunya, 2008

[36] Tomas Sevilla, "Criminología, Criminalística, Investigación Forense", Tomas Sevilla Criminología , 2005

[37] Marcos Martínez Díaz, "Vulnerabilidad en sistemas de reconocimiento basados en huella dactilar: ataques hill-climbing", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, Sep. 2006

[38] Danilo Ortega Simón, "Reconocimiento Automático Mediante Patrones Biométricos de Huella Dactilar", Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid, 2003



[39] Jorge Aching Samatelo, David Rojas Vigo, "Reconocimiento biométrico de huellas dactilares y su implementación en DSP", Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2005

[40] Almudena Lindoso Muñoz, "Contribución al reconocimiento de huellas dactilares mediante técnicas de correlación y arquitecturas hardware para el aumento de prestaciones", Dpto. Tecnología Electrónica. Universidad Autónoma de Madrid. Feb 2009

[41] María Mérida Aguilera, "Reconocimiento biométrico basado en imágenes de huellas palmares", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, Mar 2012

[42] Carlos Travieso González, Marcos del Pozo Baños, Jaime Ticay Rivas, "Sistemas Biométricos", Catedra Telefónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, May 2011

[43] Maya Binetskaya, "Reconocimiento Facial en el ámbito Forense", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, Sep. 2013

[44] Ana Belén Moreno Díaz, "Reconocimiento Facial Automático mediante Técnicas de Visión Tridimensional", Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid, 2004

[45] Luis Blázquez, "Reconocimiento facial basado en puntos característicos de la cara en entornos no controlados", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, Jan 2013

[46] Pablo Rivas Perea, Omar Velarde Anaya, Leonardo Valencia Olvera, "Reconocimiento Facial en Ambientes No-Cooperativos", Instituto Tecnológico de Chihuahua, Nov 2006

[47] Isaac Martín de Diego, Ángel Serrano, Cristina Conde, Enrique Cabello, "Técnicas de Reconocimiento Automático de Emociones", Revista Electrónica Teoría de la Educación. Universidad de Salamanca, Dec. 2006

[48] Claudia Cruz Pérez, "Reconocimiento de rostros basado en características invariantes", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Aug 2008

- [49] Miguel Á. Carreira Perpiñan, "Aplicación de las redes de neuronas de compresión a la extracción de características para el reconocimiento a partir de imágenes de la oreja", Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid, Sep. 1995
- [50] Francisco Montero Simarro, "Integración de Calidad y Experiencia en el Desarrollo de Interfaces de Usuario dirigido por Modelos", Departamento de Sistemas Informáticos. Universidad de Castilla La Mancha, Jul 2005
- [51] Paul Esteban Méndez Silva, "Implementación de un sistema de Identificación de poses en imágenes de rostros", Universidad San Francisco de Quito, Dec. 2013
- [52] Richard Nolberto Rojas Bello
, "Identificación de características relevantes para reconocimiento de emociones en el rostro", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, Oct 2009
- [53] Roberto A. Isoardi, "Optimización de análisis y registro de imágenes tomográficas", Instituto Balseiro. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina ,Apr 2010
- [54] Damián A. Álvarez, "ICA APLICADO A LA EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS EN IMÁGENES", Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia, Dec. 2008
- [55] Cristina Conde Vilda, "Verificación facial multimodal: 2D y 3D", Dpto. de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad Rey Juan Carlos, Apr 2006
- [56] David Bueno Monge, "Reconocimiento de Objetos en 3D. Utilizando Sensores de Visión y Profundidad de Bajo Coste", Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza, May 2012
- [57] I. Alemán, MC. Botella, F. Navarro, Ó. Cordon, S. Damas y J. Santamaría, "Identificación humana mediante superposición de imágenes. Una propuesta metodológica", Cuadernos de Medicina Forense, Oct 2008
- [58] Julio Cesar Rosero Moreano, "Oralidad y Competencia Comunicativa", <http://es.scribd.com/doc/42043039/La-Oralidad-y-cia-Comunicativa>
- [59] D. Campillo-Valero, E. Garcia-Guixé, "Origen y evolución del lenguaje", Revista de Neurología, 2005

- [60] Vivían Scheinsohn, "La evolución y las ciencias", Emecé Editores, 2001
- [61] Jeffrey T. Laitman, "El origen del lenguaje articulado", Editorial Fontalba, 1985
- [62] Francisco Limonche Valverde, "Alexander Graham Bell, El Humanitario", <http://historiatelefonía.files.wordpress.com/>, 2014
- [63] García Ortega Arturo, Millán Martínez Kevin, Vázquez Rodríguez Erik, "Reconocimiento automático de voz", Universidad Autónoma Nacional de México, Apr 2013
- [64] Ahuactzin Larios A., "Diccionario español/inglés para el aprendizaje de vocabulario utilizando una interfaz de voz", Universidad de las Américas-Puebla, Dec. 1999
- [65] Alexander Fandiño Rodríguez, "Estado del arte en el reconocimiento automático de voz", Universidad Nacional de Colombia. Seminario de Investigación, Apr 2005
- [66] L. Hernández Gómez, F.J. Caminero Gil, "Estado del arte en Tecnología del Habla", Universidad Politécnica de Madrid, 2011
- [67] Felipe Poblete, Mariano González, "Reconocimiento de voz para aplicación en domótica", Universidad Tecnológica Nacional, 2008
- [68] J. A. M. Cordovilla, T. Bauman, J. L. P. Córdoba, A. M. P. Herreros, Á. M.G. García, "Implementación de un reconocedor distribuido de voz en tiempo real sobre IP", IV Jornadas en Tecnología del Habla, Nov 2006
- [69] J. G. Domínguez, "Nuevas técnicas de compensación de canal en reconocimiento de locutor e idioma", Escuela Politécnica Superior. Universidad Autónoma de Madrid, 1998
- [70] M, J. Poza Lara, J. F. Mateos Díaz, J. A. Siles Sánchez, "Design of an isolated-word recognition system for the Spanish Telephone Network", Telefónica, Investigación y Desarrollo, 2006
- [71] Germán Daría Rodríguez Acevedo, "Ciencia, Tecnología y Sociedad: una mirada desde la Educación en Tecnología", Revista Iberoamericana de Educación, Sep. 1998

